MATEMÁTICA APLICADA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
UNIVERSIDADE DO PORTO
PORTO—PORTUGAL

Maria Goreti Silva Rocha

A Astronomia no Ensino da Física I



DEPARTAMENTO DE
MATEMÁTICA APLICADA - FCUP
BIBLIOTECA
Data de entrada 21 10 03
Nº de registo 4367
Cota QB61m 2002 ROCm A V1

Departamento de Matemática Aplicada

Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

Abril de 2002

Maria Goreti Silva Rocha

A Astronomia no Ensino da Física I



UNIVERSIDADE DO PORTO
BIBLIOTECA
Sala
Coloc.
N.º
FACULDADE DE CIÊNCIAS

Departamento de Matemática Aplicada

Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

Abril de 2002

Maria Goreti Silva Rocha

A Astronomia no Ensino da Física I



Dissertação submetida à Faculdade de Ciências da Universidade do Porto para a obtenção do grau de Mestre em Ensino de Astronomia

Departamento de Matemática Aplicada

Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

Abril de 2002

"Aprender é descobrir o que já sabes.

Fazer é demonstrar que já sabes.

Ensinar é lembrar aos outros que sabem tão bem como tu.

Sois todos aprendizes, fazedores, professores."

Richard Bach - Ilusões

Meus êxtases, meus sonhos, meus cansaços... São os teus braços dentro dos meus braços, Via Láctea fechando o infinito.

A duas pessoas dedico este trabalho: à Filipa e ao Filipe.

À Filipa pequenina estrela que agora está a começar de conhecer os mistérios deste mundo. Que nas estrelas descubra o caminho da sua felicidade.

Ao Filipe que um dia foi uma pequenina estrela também à descoberta dos mistérios deste mundo. Sem o seu desafio esta etapa não teria sido iniciada. Obrigada e não desistas tu dos teus sonhos.

Agradecimentos

Quero agradecer a todos que tornaram possível a realização deste trabalho, em especial:

- À Dr.ª Margarida Cunha que, ao ler e reler todo o trabalho, contribuiu de forma decisiva, com comentários e sugestões, para a sua forma final, mostrando-se sempre disponível para esclarecer todas as dúvidas que surgissem. Apoiou e conduziu cada etapa sempre de forma critica, construtiva e motivadora;

- Ao professor Filipe Fernandes, pelo seu desafio para enfrentar esta etapa, sem o qual não a teria iniciado; pelo seu constante incentivo e apoio que proporcionou durante a elaboração deste trabalho;

- às professoras Ana Maria Marques e Alexandrina Neves, profissionais da educação na área das línguas estrangeiras, pelo apoio na tradução do resumo;

- à minha mãe e ao meu irmão pela paciência nos momentos mais difíceis durante a elaboração deste trabalho.

Resumo

O estudo dos astros, de que se ocupa a Astronomia, vem desde a Antiguidade. Desde sempre e através dos tempos, o Homem observou o céu, a Lua, o Sol, as estrelas, os planetas, os cometas e até os meteoros, e tudo isso constituía, para ele, motivo de admiração, mistério e respeito.

O objectivo principal deste trabalho é motivar os professores para o ensino da Astronomia, desafiando a imaginação, e fornecendo um universo de conhecimentos fundamentais. Para isso desenvolveram-se um manual e um caderno pedagógico.

No manual, elaborado a pensar nos professores, fez-se um resumo de assuntos relacionados com a Astronomia e que podem ser desenvolvidos nas aulas de Física e Química. Procurou-se que a abordagem seja cientificamente rigorosa e ao mesmo tempo acessível.

No caderno pedagógico, construído com a intenção de ultrapassar a dificuldade sentida por muitos professores na realização de actividades, quando leccionam temas de Astronomia, é feita:

- uma resenha dos objectivos que podem ser alcançados no desenvolvimento de cada tema;
- uma resenha das concepções/ideias que os alunos apresentam sobre cada tema;
- a apresentação de algumas indicações didácticas da forma como pode ser explorado um determinado tema;
- a apresentação de algumas actividades a desenvolver com os alunos.

Estas actividades constituem apenas algumas sugestões, pois muito mais pode ser feito, dependendo da atitude/motivação do professor e dos próprios alunos face ao ensino.

Summary

The studies of the stars, a main subject on Astronomy researches, have its origins on the Ancient history. From always and through the times, Man has always watched the sky, the Moon, the Sun, the stars, the planets, the comets and even the meteors, and that has been a reason for his admiration, mystery and respect.

The purpose of this work is to motivate teachers for the learning of such an interesting subject as Astronomy, challenging the imagination, and supplying an universe of fundamental knowledge. Therefore, a handbook and a teacher's book were written. On the former, it was made a synopsis of subjects related to Astronomy and that can be analysed on the Chemistry and Physics lessons. This approach should be scientifically rigorous and at the same time accessible.

The latter was made in order to overcome the so many difficulties felt by teachers when it comes to do activities related to Astronomy. There it can be found the following items:

- a summary of the main aims to be achieved with the development of each theme;
- a summary of the essential ideas students show on each theme;
- the presentation of some pedagogical suggestions for the careful examination of each theme;
- the presentation of activities to developed with students.

These activities are only suggestions and much more it can be done, depending on the motivation of the teacher and of the students themselves towards teaching.

Résumé

L'astronomie s'occupe de l'étude des astres dès l'antiquité.

Depuis toujours et au cours du temps, l'homme a observé le ciel, la lune, le soleil, les étoiles, les planètes, les comètes et aussi les météores et, pour lui, tout cela provoquait l'admiration, le mystère et le respect.

Le but de ce travail est surtout incentiver les professeurs à l'enseignement de l'astronomie, en défiant l'imagination et aussi en leur donnant un univers d'enseignements fondamentaux. C'est pour cela qu'on a crée un manuel et un cahier pédagogique.

Le manuel a été élaboré surtout en pensant aux professeurs. On a fait un résumé de sujets liés à l'astronomie qu'on peut développer (étudier) pendant les cours des matières de physique et de chimie. On a eu comme objectif un abordage en même temps scientifique et rigoureux et accessible.

L cahier pédagogique est un instrument de travail qui va permettre aux professeurs surmonter les difficultés au moment où ils abordent les thèmes de l'astronomie. De cette façon on peut y trouver:

- une énumération des objectifs qui peuvent être atteints pendant l'étude de chaque thème ;
- une énumération des concepts/idées fournis par les élèves au cours de l'étude de chaque thème ;
- une présentation didactique indiquant le chemin à parcourir à l'étude d'un thème ;
- une présentation de quelques activités à développer avec les élèves.

Ces activités ne sont que des suggestions de travail. On peut en adopter d'autres. Cela dépend de l'intérêt que les professeurs et les élèves ont par rapport à l'apprentissage de l'astronomie.

MATEMÁTICA APLICADA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
UNIVERSIDADE DO PORTO
PORTO — PORTUGAL

Índice

Capítulo 0 – Introdução pág.

O carácter da Ciência 1
Modelos em Ciência 2
O "programa" da Física enquanto Ciência 3
Educação cientifica 4
O papel da experimentação na educação cientifica 6
Tipos de experiências 9
A Astronomia no ensino da Física – Pertinência do trabalho 10
Objectivos do trabalho 12
Estrutura do trabalho 12

Capítulo 1 – Astronomia o que é?

1.0 Introdução 15
1.1 Astronomia e Astrologia 15
1.2 Um pouco de história 17
1.2.1 A Astronomia e as necessidades básicas do Homem 17
1.2.2 Os astrónomos da Grécia antiga 20

Capítulo 2 – O Sistema Solar

2.0 Introdução 23
2.1 Características gerais do Sistema Solar 23
2.1.1 Composição do Sistema Solar 26
2.1.2 Espaço Interplanetário 27
2.1.3 Os Planetas Terrestres 28
2.1.4 Os Planetas Jupiterianos 29
2.2 Origem do Sistema Solar 30
2.2.1. Características unificadoras do Sistema Solar 30
2.2.2 Teorias de formação do Sistema Solar 31
2.3 Modelos do Sistema Solar 33
2. 4 Os principais elementos do Sistema Solar 36
2.4.1 O Sol 36
2.4.2 Mercúrio 45
2.4.3 Vénus 49
2.4.4 Terra 52
2.4.5. Lua 57
2.4.6 Marte 60
2.4.7. Júpiter 66
2.4.8. Saturno 71
2.4.9. Urano 75
2.4.10. Neptuno 79
2.4.11 Plutão 82
2.4.12 Os Asteróides 86
2.4.13. Introdução aos Cometas 91
2.5 Movimentos dos planetas 93
2.6 Fases da Lua e eclipses 102
2.7 Calendários 106

Capítulo 3 - Galáxias

3.0 Introdução	111
3.1 A nossa Galáxia – Via Láctea	111
3.2 O tamanho e forma da Galáxia usando contagens de objectos – W. Herschel	112
3.3 A descoberta das galáxias	113
3.4 Classificação morfológica de galáxias	114
3.4.1 Galáxias Espirais (S)	115
3.4.2 Galáxias Elípticas (E)	117
3.4.3 Galáxias Irregulares (I)	118
3.5 Massas das galáxias	119
3.6 A formação e evolução das galáxias	121
3.7 Aglomerados de galáxias	123
3.8 Quasares e galáxias activas	125

Capítulo 4 – O Universo como um todo

4.0 Introdução	133
4.1 Um pouco de história	133
4.2 As maiores estruturas do Universo	134
4.3 Princípio Cosmológico	135
4.4 Expansão Cósmica	136
4. 5 Destino do Universo	142
4.6 A Idade do Universo	147
4.7 A Geometria do Espaço	148
4.8 A Radiação Cósmica de Fundo	149
4.9 Matéria e Radiação	151
4.10 Relatividade Geral	152
4.11 A Formação de Núcleos e Átomos	155
4.12 Inflação Cósmica	157

Capítulo 5 – Interacção gravítica

5.0 Interacção Gravítica	161
5.1 Introdução	161
5.2 O Universo irrequieto	162
5.2.1 De Aristóteles a Galileu	163
5.3 Porque se movem e não caem os astros?	164
5.4 Lei da gravitação universal	168
5. 4.1 A "Constante" k	172
5.5 Peso e massa de um corpo	173
5.6 Peso e força gravítica	176
5.7 Massa gravítica e massa inercial	178
5.8 Forças Gravitacionais Diferenciais	179
5.8.1 Derivação da força diferencial	180
5.9 Marés	181
5.9.1 Expressão da força de maré	182
5.9.2 Comparação das marés produzidas na Terra pela Lua e pelo Sol	183
5.9.3 Rotação sincronizada	184

5.9.4 Limite de Roche 186
5.10 Precessão do Eixo da Terra 189
5.10.1 Caminho aparente do Polo Norte celeste no céu 191

Capítulo 6 – Interacção magnética

6.0 Interacção magnética 193
6.1 Introdução 193
6.2 A origem dos campos magnéticos planetários 194
6.3 Teorias para a origem dos campos magnéticos planetários 195
6.4 O Universo e as magnetosferas 197
6.4.1 As Magnetosferas 197
6.5 Os diferentes campos magnéticos 204
6.5.1 Campo Magnético do Sol 205
6.5.2 Campo magnético de Mercúrio 208
6.5.3 Interacções do vento solar com Vénus 209
6.5.4 Campo Magnético da Terra 211
6.5.5 O campo magnético da Lua 217
6.5.6 Campos magnéticos em Marte 219
6.5.7 Campo magnético intrínseco de Júpiter 220
6.5.8 Campo magnético intrínseco de Saturno 222
6.5.9 Campo magnético intrínseco de Urano 224
6.5.10 Campo magnético intrínseco de Neptuno 225
6.5.11 Comparação dos campos de Urano e Neptuno 226
6.6 Campos magnéticos na formação estelar 226
6.7 Campos magnéticos estelares 227
6.7.1 Efeito de Zeeman 228

Capítulo 7 – Escalas e distâncias

7.0 Introdução 229
7.1 Unidades de distância no Universo 229
7.2 Escalas 231
7.3 Como medir a distância entre a Terra e os astros próximos? 232
7.4 Determinação da distância de uma estrela 234

Capítulo 8 – A esfera celeste

8.0 Introdução 237
8.1 A Esfera Celeste 237
8.2 Sistema de Coordenadas Geográfico 242
8.2.2 Coordenadas Astronómicas 243
8.2.2.1 O Sistema Horizontal 243
8.2.2.2 O Sistema Equatorial Local 244
8.2.2.3 O Sistema Equatorial Celeste 245
8.3 Tempo Sideral 246
8.4 Movimento Diurno dos Astros 247
8.5 Posições características do Sol 249
8.6 Variações das Coordenadas 251
8.7 Constelações 253
8.7.1 Coordenadas das Constelações 255

8.7.2 Utilização dos mapas estelares e da carta celeste 256
8.8 Orientação e observação do céu 260

Capítulo 9 – Evolução estelar
9.0 Introdução 261
9.1 Propriedades de Estrelas 261
9.2 Estrutura Estelar: 281
9.3 Formação de Estrelas 287
9.3.1 Protoestrelas: 289
9.3.2 Emissão de radiação em estrelas jovens 293
9.3.3 Aglomerados Estelares 294
9.3.4 Origem da energia estelar 296
9.4 EVOLUÇÃO ESTELAR 301
9.4.1 Anãs Castanhas 301
9.4.2 Pré- Sequência Principal: da juventude à meia-idade 302
9.4.3 Uma fase de estabilidade: a sequência principal 303
9.4.4 Gigantes e Supergigantes Vermelhas 306
9.4.5 Evolução de Gigantes Vermelhas 309
9.4.6 Estrelas do Ramo Horizontal 310
9.4.7 Estrelas do Ramo Assimptótico de Gigantes: 311
9.4.7 Nebulosa Planetária: 314
9.4.8 Anãs Brancas 315
9.4.9 Sequência da vida de uma estrela - síntese 319

Anexos 321
Bibliografia 329

Capítulo 0 - Introdução

Neste primeiro capítulo, pretende-se caracterizar:

- A Física enquanto ciência e, em particular, enquanto ciência experimental;
- A Astronomia enquanto ciência observacional.

Procura-se ainda definir os objectivos da educação científica, e enquadrar de forma adequada o papel da experimentação na consecução dos mesmos. Para isso, é feita uma breve revisão das investigações efectuadas nesta área, incluindo uma classificação dos vários tipos de experiências.

Neste primeiro capítulo procurara-se ainda justificar o porquê da escolha do tema e a metodologia escolhida para o desenvolver.

O carácter da Ciência

A palavra "ciência" tem a sua origem semântica no vocábulo latino *scire*, o qual significa genericamente, saber.

Hoje contudo, considera-se que a ciência não é a única fonte de conhecimento, enumerando-se um conjunto de quatro categorias de aprendizagem humana(Cooke,C., 1996):

- Ciência experimental (a Física e a Química são importantes exemplos)
- Ciência observacional (a Astronomia é um caso típico)
- Quase- ciência (onde se incluem a sociologia, a Economia,etc.)
- Não ciência (como a Arte, a Música e a Literatura)

O carácter da ciência encontra-se sempre associado ao facto de lidar com teorias quantitativas, confrontadas permanentemente com os resultados da observação.

A principal característica que distingue uma ciência experimental é a possibilidade de controlar as condições em que as observações são feitas. O desenvolvimento tecnológico, que permitiu melhorar o controlo dessas condições, é uma das razões apontadas para o extraordinário avanço das ciências experimentais nas últimas décadas.

Actualmente reconhecem-se três métodos para investigar a natureza, já que a modelação computacional veio juntar-se à experimentação e à análise teórica.

Modelos em Ciência

Os problemas, em ciência, tornam-se frequentemente demasiado complexos para que se possa prestar uma atenção simultânea a todos os detalhes. Surgem assim os modelos teóricos. Estes, não devem ser tão simples que representem uma interpretação demasiado pobre da realidade, nem tão complexos que impossibilitem a sua utilização prática.

Os modelos, que podem ser geométricos ou algébricos, representam simplificações da realidade, com a qual não devem ser confundidos, este aspecto é particularmente importante no ensino das ciências.

A Física Clássica desenvolveu-se à custa de modelos baseados essencialmente em experiências sensoriais a nível macroscópico, bem patentes nas designações dos diversos ramos que a constituem (mecânica, calor, acústica, óptica, etc.). As noções de "localização" e "extensão" e os conceitos de "partícula", "campo" ou "onda" permitiram explicar de modo satisfatório o funcionamento do nosso mundo macroscópico.

O advento da Física Moderna trouxe, contudo, uma revolução conceptual: a impossibilidade de transferir para o mundo submicroscópico os modelos da Física macroscópica, obrigou ao uso de modelos algébricos sem qualquer tipo de correspondência com a nossa experiência sensorial, ou nos quais conceitos anteriormente exclusivos surgem aqui de uma forma complementar (onda - partícula).

Esta não foi, no entanto, a única revolução: o espantoso desenvolvimento das técnicas experimentais, que permitiu observar o mundo extrasensorial, venceu barreiras anteriormente intransponíveis de distâncias, intervalos de tempo, temperaturas ou energias. As escalas de construção dos modelos foram, assim, radicalmente alteradas, revelando a sua grande dependência dos meios tecnológicos colocados à disposição dos investigadores.

Por vezes os modelos aumentam de complexidade, à medida que a compreensão dos problemas aumenta. Outras vezes tendem a simplificar-se, quando libertos de ideias erradas, previamente introduzidas.

O "programa" da Física enquanto Ciência

A classificação do conhecimento científico em categorias torna-se cada vez mais difícil de fazer. As ciências "tradicionais" desdobram-se sucessivamente em áreas transversais, numa busca constante de interdisciplinaridade. Simultaneamente, os objectivos de cada ciência são redefinidos e os seus métodos repensados.

No que respeita à Física, podemos resumir o seu "programa" do seguinte modo (Alonso, M., 1997):

- É uma ciência observacional e experimental.
- Os objectivos do seu estudo são "sistemas": galáxias, estrelas, sólidos, gases, moléculas, átomos, núcleos, partículas fundamentais.
- Os físicos dissecam os "sistemas" nos seus componentes.
- Para sistematizarem as suas observações, os físicos formulam relações empíricas e leis gerais (que, estão, é claro, sujeitas a mudança) e formulam novos conceitos (momento, energia, etc.).
- Em seguida os físicos procuram "estruturas" nos sistemas analisados.
- Então os físicos procuram "interacções" entre os componentes para explicar as estruturas do sistema (construção de modelos).
- Os modelos evoluem e são refinados ou abandonados à medida que conseguimos mais informação acerca do sistema.

Por outro lado, um dos aspectos mais importantes dos métodos da Física Moderna está na relação entre observação/experimentação e teoria. Assim, é importante realçar (Brodin, G., 1978) que:

- Existem fenómenos e relações que não podem ser descritos satisfatoriamente por nenhuma teoria.
- Teorias que não sejam devidamente validadas pela experimentação podem levar a resultados absurdos ou erróneos.

Dois exemplos simples que confirmam estas afirmações, são os fenómenos de interferência eléctrica nos sistemas de medida, e a inaplicabilidade das leis de Ohm e Kirchhoff a altas frequências.

Inversamente, podemos afirmar que:

- Muitos fenómenos e relações não podem ser descritos satisfatoriamente sem uma teoria adequada.
- Experiências não conduzidas por teorias levam frequentemente a resultados absurdos ou erróneos.

A dualidade desta argumentação evidencia de modo claro a relação simbiótica existente entre observação/experimentação e teoria.

Educação cientifica

Entender o mundo que nos rodeia, de modo a melhor interagirmos com ele, poderia ser a principal finalidade da educação científica, essencial para a própria sobrevivência da espécie humana.

Esta grande finalidade subdivide-se em muitas outras, quando se consideram diferentes contextos sócio-económicos, diferentes políticas educativas ou diferentes níveis etários.

A educação científica pode ser encarada sob três aspectos essenciais (Hodson, D., 1992):

- Aprender ciência – adquirir um certo número de conceitos científicos e familiarizar-se com algumas das principais teorias cientificas
- Aprender acerca da ciência – desenvolver alguma compreensão acerca da natureza da ciência e da prática cientifica, e tomar consciência das complexas relações entre ciência, tecnologia, sociedade e ambiente.
- Fazer ciência – adquirir o conhecimento e competências necessárias para realizar uma pesquisa científica, e usar essa capacidade para conduzir investigações "genuínas" – algumas auto-dirigidas, outras vezes sob a orientação do professor.

É importante que a educação cientifica comece o mais cedo possível, a um nível inicialmente qualitativo, de modo a aproveitar a curiosidade natural das crianças e a sua procura de actividades com objectivos concretos. A escola deve proporcionar-lhes experiências enriquecedoras, que contribuam para reduzir as assimetrias provocadas pelos diferentes meios socioculturais e económicos de que provêm

Desde há alguns anos que existe uma tendência para dirigir a educação científica no ensino básico para temas do quotidiano, numa perspectiva de "ciência para a cidadania". Este objectivo depara, muitas vezes, com um obstáculo motivacional, para muitos inesperado: os objectivos e factos do quotidiano nem sempre despertam a atenção e a curiosidade do aluno, já que, pertencendo ao seu dia-a-dia, este se habituou a viver com eles.

Facto análogo se verifica entre o cidadão comum e a tecnologia. Cada vez mais se instala a perspectiva do utilizador: desde o momento que *funcione*, ele não se preocupa, nem se interroga acerca de como funciona.

Assim, a educação científica deve começar por despertar a curiosidade do aluno – e do cidadão – para aquilo que o rodeia, realçando a importância do que, à primeira vista, pode parecer trivial.

O ensino da Astronomia constitui uma oportunidade de responder a algumas questões que surgem com a natural curiosidade dos alunos, assim como para satisfazer, e desenvolver a sua imaginação. Mais ainda, este estudo pode aproximar a escola da actualidade do mundo, no sentido em que é uma área de particular interesse que pode ajudar os alunos a compreender factos do quotidiano repetidamente presenciados. Contudo há diversos problemas de ordem prática associados ao ensino da Astronomia.

Um aspecto a ter em conta, quando se discute a educação cientifica, é o problema da subjectividade da observação. Afirmava o pré-historiador A. Leroi-Gourthan que "os olhos apenas vêem o que estão preparados para ver". A história da Astronomia é uma demonstração permanente da veracidade destas palavras.

Um mesmo acontecimento não apresenta o mesmo significado, quando observado por indivíduos em épocas diferentes. Podemos transpor esta ideia para o plano didáctico, já que um mesmo facto terá diferentes significados, observado por alunos educados em ambientes diferentes, e portanto com um referencial sócio-cultural distinto.

Cabe ao professor a tarefa essencial de orientar devidamente as observações do aluno, disponibilizando o referencial teórico adequado.

O papel da experimentação na educação cientifica

Muito se tem discutido acerca do papel da experimentação na educação cientifica. Desde a posição fundamentalista de que tudo pode ser conseguido através do trabalho experimental, até à posição economicista, igualmente contestável, de que este é um desperdício de tempo e de dinheiro, diferente importância lhe tem vindo a ser atribuída por educadores e investigadores.

Parece, contudo, haver algum consenso de que o trabalho experimental, tal como é desenvolvido pela maioria dos professores, deve ser repensado.

É um dado adquirido, hoje em dia, tanto em ciência como em educação, que da simples observação não resulta um verdadeiro conhecimento. Sem um referencial teórico adequado, a observação pode tornar-se simplesmente inútil, ou até levar a resultados indesejáveis. O chamado "ensino por descoberta", muito popular nos EUA há algumas décadas, tentou, de modo artificial, encontrar um suporte teórico na psicologia evolutiva de Piaget, aproveitando a ideia de que a experiência com objectos concretos é um requisito importante para o crescimento cognitivo, especialmente em indivíduos que ainda não desenvolveram uma estrutura cognitiva que lhes permita realizar operações lógico-formais.

Apesar de eventualmente defensável, do ponto de vista motivacional, deste modelo de ensino apenas sobreviveu a descoberta guiada, em que nas actividades, preparadas pelo professor, são reservadas pequenas sequências de aprendizagem que o aluno pode descobrir.

Para enquadrar correctamente o trabalho experimental no contexto da educação cientifica, é necessário definir os seus objectivos e verificar quais deles são efectivamente atingidos, comparando a sua efectividade com a de outros métodos de ensino.

Geralmente as listas de objectivos do trabalho experimental centram-se em três áreas:

(a) desenvolvimento e aquisição de competências práticas e técnicas laboratoriais;

(b) familiarização com fenómenos e acontecimentos científicos;

(c) envolvimento dos alunos no processo de investigação científica.

(a) Embora os investigadores em didáctica apontem a necessidade de reformular o trabalho experimental numa base de investigação genuína e resolução de problemas, não é sugerido que todo o trabalho experimental deva ser deste tipo. Continuará a haver necessidade de trabalhos práticos cujo objectivo seja predominantemente a aquisição de competências experimentais (Kempa, R. F., 1988).

Em Portugal, a desvalorização dos trabalhos práticos nas escolas, que acompanhou a explosão escolar nas últimas décadas, produziu várias gerações de professores com uma total inércia para a implementação de actividades experimentais, que se traduz actualmente num considerável entrave à sua reintrodução. Existe por parte de muitos profissionais uma rejeição primária de todo o tipo de auxiliares de ensino com uma base tecnológica: instrumentos eléctricos ou electrónicos, computadores e até audiovisuais.

Este é um problema que demorará igualmente várias gerações a ultrapassar, exigindo das autoridades educativas um cuidado especial nos programas de formação de professores.

(b) Para além das competências anteriormente referidas, o trabalho experimental tem certamente um papel importante a desempenhar na vivência de fenómenos físicos concretos. Muitas das situações não podem ser, normalmente, substituídas por vídeos ou aprendizagem assistida por computador (CAL), como alguns autores referem (Hodson, D., 1992).

Existem inúmeras investigações acerca de misconceptions (concepções alternativas) que os alunos desenvolveram durante actividades experimentais (Drive, R., 1983, Osborne, R., e Freyberg, P., 1985, Tasker, R., 1981, entre outras).

Não são conhecidas, contudo, investigações conclusivas acerca da utilização dos métodos de ensino apontados em alternativa; está, portanto, por demonstrar, que tenham uma eficácia superior.

Argumentos habituais em favor da utilização do CAL apontam a sua capacidade para libertar o aluno das "restrições e distorções das experiências concretas, permitindo portanto que se concentrem nos aspectos conceptuais" (Hodson, D., 1992).

No entanto, parece-me um erro ensinar ciência, de uma forma sistemática, à custa de modelos artificiais "perfeitos", não só pelo risco de se gerarem confusões entre estes e a realidade concreta, mas também pela visão errada que é transmitida acerca do que é "fazer" ciência.

Os eventuais insucessos experimentais podem, do ponto de vista formativo, ser tanto ou mais valiosos do que uma experiência bem sucedida, se convenientemente explorados pelo professor.

Os novos meios informáticos, devem usar-se sobretudo para a manipulação de grandes quantidades de informação ou para a simulação de condições que dificilmente possam ser conseguidas por via experimental.

Perante a actual profusão de software "educativo", os professores devem ser bastante criteriosos, já que, sob a capa de uma pretensa modernidade, esconde-se o interesse comercial de quem procura vender produtos, de qualidade pedagógica e cientifica muitas vezes duvidosa.

Ao utilizar a experimentação numa perspectiva demonstrativa, com vista à familiarização com fenómenos e acontecimentos científicos, parecem ser relevantes as estratégias conhecidas genericamente por "Prever-Observar-Explicar" (Gunstone, R.F., 1988):

> *É pedido aos estudantes que efectuem uma previsão do que irá passar-se em determinada situação, por escrito; durante a demonstração, os alunos registam as suas observações, e é feita então uma confrontação entre estas e as previsões anteriormente efectuadas.*

Gunstone e os seus colaboradores baseiam-se em dados da Psicologia da Aprendizagem, segundo os quais o estímulo para o desenvolvimento conceptual é o reconhecimento de contradições e incongruências entre ideias (Piaget, J., Inhelder, B., 1958).

(c) Finalmente, o trabalho experimental não deve limitar-se às actividades anteriormente referidas: adquiridas as necessárias competências experimentais, deve ser deixado um largo espaço para a realização de investigações "genuínas" pelos alunos, através das quais são desenvolvidas capacidades de resolução de problemas práticos.

Entre os objectivos do trabalho experimental contam-se também alguns de ordem atitudinal e afectiva. A simples motivação é apontada muitas vezes como argumento a favor do trabalho experimental nas escolas. O trabalho prático é por excelência um meio através do qual os alunos constróem o seu próprio conhecimento, pois permite-lhes testar as hipóteses por eles mesmo formuladas para responder aos problemas propostos. A confrontação entre essas hipóteses e os resultados das experiências permite-lhes verificar a veracidade das suas concepções originais, podendo favorecer o "levantar" de novas questões para posterior resolução (Nieda, 1994). Um dos problemas do estudo da Astronomia é a falta de trabalho prático. O tipo de trabalho experimental é um pouco diferente, prevalecendo as observações e a construção de modelos. O laboratório de um astrónomo é o céu, que se encontra sempre lá em qualquer dia claro ou noite. Exemplos típicos são a observação da Lua durante um mês e a observação das constelações no céu. Contudo este tipo de trabalho não pode ser realizado pelo professor, sendo necessário que os alunos estejam suficientemente motivados, para realizarem essas tarefas à noite, fora da sala de aula.

Tipos de experiências

Ao longo do trabalho serão designadas por *experiências demonstrativas* as actividades experimentais, qualitativas ou quantitativas, destinadas à visualização de fenómenos, verificação de leis ou medição de constantes físicas, independentemente de serem realizadas por alunos, individualmente ou em grupo, por um professor perante uma turma, ou por um palestrante perante uma audiência.

Esta designação, bem como a de *demonstrações*, é algumas vezes reservada às experiências realizadas por um professor ou palestrante, utilizando-se a expressão *experiências formativas* para aquelas que são realizadas pelos alunos.

Alguns autores estabelecem ainda uma diferença entre *experiências práticas* (aquelas que apenas cumprem o objectivo de familiarizar os alunos com fenómenos e acontecimentos científicos) e *trabalhos práticos*.

Contrastando com aquele tipo de experiências, existe outro, habitualmente designado por experiências investigativas. Nestas, não é fornecido um protocolo detalhado para executar de forma mais ou menos mecânica, mas existe a

preocupação de resolver um problema, encontrar uma resposta à partida desconhecida para o aluno, seguindo uma estratégia que ele próprio deve definir.

Esta dicotomia entre demonstração e investigação, pode ter variantes, de acordo com o grau de autonomia da experimentação, o detalhe das instruções contidas no protocolo ou o tipo de orientação do professor.

A preocupação essencial deste trabalho é fornecer aos professores de Física, uma ferramenta capaz de os ajudar a resolver dificuldades de ordem experimental no ensino da Astronomia. Assim, incluem-se protocolos detalhados para uma lista bastante exaustiva de experiências demonstrativas.

Defende-se e encoraja-se, contudo, a possibilidade de conversão de muitas das experiências demonstrativas em actividades investigativas, de acordo com os objectivos de ensino, as potencialidades dos alunos e o próprio tempo disponível. Esta tarefa, que não é normalmente simples, é deixada como desafio à criatividade dos professores.

A Astronomia no ensino da Física – Pertinência do trabalho

Como se pode facilmente ver através de uma simples análise transversal dos programas curriculares, o ensino de conteúdos relacionados com a Astronomia inicia-se logo no 1º ciclo do ensino básico, no terceiro ano de escolaridade onde são abordados os conceitos simples como a noite e o dia; posteriormente, no 4º ano, são abordados os conceitos relacionados com a Terra no Sistema Solar. Existe depois uma ruptura e só no 7º ano, em Ciências Naturais, é que regressam conteúdos relacionados com o Sistema Solar e mais tarde, no 8º ano, de uma forma muito mas abrangente, pretende-se dar uma visão global de um grupo vastíssimo de conceitos.

Porque a nível de formação de professores esta foi uma área durante muitos anos esquecida, os jovens ao ingressarem na carreira docente sentem muitas dificuldades, que os próprios colegas mais velhos não conseguem colmatar. Muitas vezes o que sucede é que, face ao vastíssimo programa da disciplina, a área que normalmente fica para o fim é a unidade temática "Nós e o Universo", ficando muitas vezes por dar. Procurando pois colmatar esta falta de formação, procuro reunir as informações necessárias e algumas actividades a desenvolver durante as aulas, de modo a poder facilitar o ensino da Astronomia. Muitas vezes

as informações apresentadas têm um carácter mais profundo do que o exigido a nível do ensino básico[1]. Fica pois a cargo de cada professor seleccionar a informação que pretende. Este manual pretende servir de ferramenta de trabalho não só no ensino básico, mas também no ensino secundário. Realço contudo, ao longo do trabalho, os aspectos físicos em detrimento dos químicos. Para estes seria necessário um outro desenvolvimento integral, pois nas estrelas está a origem da Química e dos processos químicos.

A relevância do tema é evidenciada pelos conteúdos programáticos com ele relacionados, de diferentes disciplinas leccionadas ao longo do ensino básico e ao longo do ensino secundário, do 10º ao 12º anos, do agrupamento 1.

O anexo 1 mostra as várias unidades programáticas de diferentes disciplinas, o ano em que são leccionadas ou que se relacionam de alguma forma com os temas tratados. Esta análise foi feita com os programas curriculares antigos. No entanto, na análise das novas sugestões curriculares para o ensino básico, observa-se uma nova organização estrutural, mantendo-se os conteúdos relacionados com a Astronomia. Assim, mantêm-se a pertinência deste trabalho, mesmo na nova estrutura curricular.

Contudo, face ao novo programa de Física e Química A[2], para o 10º ano, há conteúdos que poderiam ter sido abordados com maior profundidade, nomeadamente no capítulo sobre estrelas. Devido ao facto de só ter tomado conhecimento do novo programa na parte final da realização do trabalho, limitei-me a dar algumas indicações bibliográficas sobre os novos conteúdos.

Neste novo programa é de salientar que ao invés da compartimentação de conhecimentos, como a que escolhi, as sugestões são de uma interligação dos conceitos. Apesar desta inovação, quando se faz uma leitura mais aprofundada do programa depara-se com uma deficiente oferta de propostas de actividades pedagógicas. Quando se analisam as estratégias estas pouco diferem das tradicionais, excepto na utilização e análise de espectros de estrelas. Neste novo programa do 10º ano, procura-se fazer o estudo da Química "Das estrelas ao átomo", partindo do Big Bang, origem do Universo, até ao modelo actual do Universo; desde os berçários de estrelas até à resposta de onde vêm os

---

[1] Em determinados assuntos é referida bibliografia para aprofundamento dos conhecimentos.

[2] Este não está incluído na análise elaborada inicialmente aos programas curriculares, por a ele não ter tido acesso em tempo útil.

elemento químicos. A análise dos espectros das diferentes estrelas com a finalidade de estudar os elementos é uma das actividades sugeridas Posteriormente, na parte de Física, voltam a ser referidos conceitos ligado à Astronomia no estudo "Do Sol ao aquecimento".

Objectivos do trabalho

De uma forma geral este trabalho tem como objectivos:

- ✓ Promover a compreensão dinâmica do Universo;
- ✓ Sensibilizar para o contributo do estudo do Universo como factor de desenvolvimento;
- ✓ Proporcionar as bases teóricas necessárias para algumas interpretações da realidade;
- ✓ Estimular uma visão humana da Ciência, fomentando a compreensão das relações entre Ciência –Tecnologia – Sociedade.

Em última análise, o objectivo deste trabalho é motivar os professores para o ensino da Astronomia, desafiando a imaginação, e fornecendo um universo de conhecimentos fundamentais. Assim, uma vantagem deste trabalho é o facto de os professores não necessitarem de consultar bibliografia variada sobre os diversos temas, uma vez que os aspectos essenciais estão aqui explorados e compilados. Mesmo assim, são dadas referências bibliográficas para aprofundamento dos assuntos.

Estrutura do trabalho

O trabalho está desenvolvido em capítulos independentes uns dos outros. Assim, fica a cargo de cada um seleccionar a ordem que pretende, contudo é obvio que existem alguns que devem ter uma sequência lógica.

O trabalho encontra-se dividido em duas partes:

- ✓ 1ª Parte Teórica

A primeira parte o trabalho apresenta apenas aspectos teóricos da Astronomia. Espera-se que sirva de ferramenta de trabalho a professores, sem necessitarem de consultar bibliografia detalhada na preparação das suas aulas. Foram explorados nos diferentes capítulos que a integram aspectos relacionados com:

- Astronomia o que é?

- Sistema Solar
- Galáxias
- Universo
- Interacção gravítica
- Interacção magnética
- Escalas e distâncias
- Localizar astros
- Estrelas

É feita uma apresentação da informação teórica correspondente, podendo incluir desde notas históricas, desenvolvimentos matemáticos (breves), informações sobre a exploração, dados físicos, etc.

✓ 2ª Parte Didáctica:

Esta está relacionada com a primeira, sendo cada capítulo identificado com a mesma numeração que o correspondente da primeira parte, apenas acrescentando a letra A.

Esta é dedicada a aspectos mais pedagógicos. Todos os capítulos têm uma estrutura comum:

- Objectivos gerais
- Algumas ideias dos alunos
- Indicações didácticas
- Actividades

Desta segunda parte consta em anexo o CD, com as apresentações multimédia sobre: Sistema Solar, Galáxias, Estrelas, disponível para os professores utilizarem nas suas aulas.

Capítulo 1 - Astronomia o que é ?

1.0 Introdução

Olhar o céu numa noite escura e límpida, para além de nos proporcionar uma visão agradável permite-nos admirar inúmeros corpos celestes – os astros.

O conjunto de todos os astros e do espaço que os envolve constitui o Universo.

A ciência que se ocupa do estudo dos astros é a Astronomia.

A ciência que tem por objectivo o conhecimento do Universo, a sua origem e a sua estrutura é a Cosmologia.

Desde o primeiro contacto que deve ser ultrapassada e corrigida a ideia comum que associa a Astrologia e a Astronomia.

1.1 Astronomia e Astrologia

O estudo dos astros, de que se ocupa a Astronomia, vem desde a Antiguidade. Desde sempre e através dos tempos, o Homem observou o céu, o Sol, a Lua, as estrelas, os planetas, os cometas e até os meteoros, e tudo isso constituía, para ele, motivo de admiração, mistério e respeito.

Embora o Homem primitivo aprendesse gradualmente a servir-se do céu como meio de organizar a sua vida, elaborando calendários, predizendo diversos acontecimentos, utilizando as estrelas para determinar as direcções na navegação através dos mares, etc., também experimentava receio perante os corpos celestes, considerando-os como habitações ou mesmo manifestações dos deuses poderosos que o controlavam a ele e a todos os acontecimentos do Mundo. Os vários astros eram considerados como deuses, senhores da chuva, do bom tempo, da fertilidade dos campos, do destino dos homens, etc.

Assim teve inicio a Astrologia, que estuda a relação entre os movimentos das estrelas e planetas e a suposta influência destes sobre os assuntos humanos.

Os astrólogos, partindo de cálculos que só eles conheciam, traçaram cartas, a que chamavam horóscopos, com base nas quais tentavam predizer os acontecimentos futuros. Esta prática de prever o destino dos homens, com base na interpretação

dos fenómenos celestes, tornou a Astrologia uma pseudo ciência muito importante e amplamente divulgada na Europa até aos séculos XVI e XVII, sendo ainda hoje muito popular em diversas partes do Mundo. Os astrólogos tornaram-se extremamente influentes, sendo mesmo consultados por reis, governantes, homens ricos e poderosos.

A Astrologia, para além de ter tido influência no desenvolvimento da Astronomia, também contribuiu, por exemplo, para o desenvolvimento da Medicina e da Química. É curioso notar que a Alquimia adoptou símbolos planetares dos astrólogos para designar diversos elementos químicos, como, por exemplo, o planeta Marte, que recebeu o nome do deus romano da guerra e deu o seu símbolo ao ferro.

A Astronomia esteve durante muito tempo ligada á Astrologia. As observações, que inicialmente poderiam ter sido puramente espirituais ou religiosas, foram-se tornando gradualmente mais cientificas, encorajando o desenvolvimento da Astronomia.

Apesar da falta de interesse da ciência moderna pela Astrologia, o trabalho dos primeiros astrólogos foi de grande valor para o desenvolvimento de outras ciências. À medida que a Astronomia foi progredindo como ciência, a Astrologia foi perdendo importância e o seu interesse diminuindo.

Actualmente, a Astronomia desenvolve-se como ciência que estuda os astros, a sua constituição, as suas posições relativas e as leis dos seus movimentos. Genericamente investiga o Universo exterior à Terra e à sua atmosfera. A Astronomia especializou-se em diversos ramos:

- Cosmologia
- Cosmogonia
- Evolução estelar
- Etc.

Tornou-se numa ciência muito importante, na medida que procura explicar, através do conhecimento do Universo, a nossa própria origem.

1.2 Um pouco de história

1.2.1 A Astronomia e as necessidades básicas do Homem

A Astronomia, uma das ciências mais antigas, surgiu a partir dos esforços feitos por sucessivas gerações de pessoas que procuraram, ao longo dos séculos, interpretar o espectáculo maravilhoso e intrigante que o céu lhes proporcionava.

Começou por ser fundamentalmente utilitária e as suas aplicações imediatas destinavam-se a satisfazer as necessidades prementes da humanidade: para a agricultura, base da subsistência, era vital determinar o início das estações do ano, prevendo épocas mais adequadas para as sementeiras; as cerimónias e rituais religiosos (tal como ainda hoje sucede com a Páscoa) tinham de ser realizados em épocas próprias, que exigiam preparação antecipada.

A astronomia também foi indispensável à navegação longe das costas, permitindo aos navegadores o conhecimento das suas posições no mar e a determinação dos rumos a seguir: sem ela os descobrimentos não teriam sido possíveis e o homem dificilmente se teria aventurado a cruzar os oceanos.

Durante o século XVIII, a Astronomia, conciliando observações e teorias, atingiu uma fase evolutiva que permitia explicar o que se observava e prever acontecimentos futuros.

Essa aventura do conhecimento, iniciada há milénios, ainda hoje continua: nas últimas décadas fez um progresso enorme devido ao desenvolvimento tecnológico.

A contemplação do céu permitiu ao homem primitivo reconhecer a existência de fenómenos que, repetindo-se com suficiente regularidade, lhe permitiram estabelecer padrões naturais de tempo: a sucessão dos dias e das noites e, noutra escala, as fases da Lua, foram talvez as mais óbvias.

A essas regularidades outras se foram a pouco e pouco juntando: as estrelas parecem fixas no interior de uma grande bola – a esfera celeste – que roda lentamente; o nascimento das estrelas ocorre sempre do lado oriental do horizonte; alguns pontos luminosos (os planetas) movem-se em relação ás estrelas, mas retomam periodicamente as suas posições.

Observando sistematicamente o céu, o Homem aprendeu a prever as estações, a contar a passagem dos anos e a situar os acontecimentos no tempo.

À medida que verificavam tudo isto, os nossos antepassados foram-se apercebendo da existência de uma ordem natural.

UNIVERSIDADE DO PORTO
FACULDADE DE CIÊNCIAS
BIBLIOTECA

Alguns acontecimentos raros, como os eclipses e as passagens dos cometas, pareciam perturbar esta ordem natural e eram, por isso, muitas vezes tomados como ameaças dos deuses descontentes com os homens. No entanto, á parte estes acontecimentos menos vulgares, a natureza mostrava-se "cumpridora" e "pontual", aos olhos da humanidade.

Conhecer o céu tornou-se imperativo para a sobrevivência. Muitas civilizações antigas esforçaram-se no sentido de adquirir e aperfeiçoar esse conhecimento. O Homem passou a relacionar as regularidades que via no céu com o melhor aproveitamento dos recursos da Terra: existiam regularidades na natureza e o Homem podia utilizá-las em seu benefício.

Sucessivas gerações de astrónomos dedicados aperfeiçoaram instrumentos e refinaram técnicas, permitindo a detecção de outras regularidades e descobrindo pequenas variações noutros fenómenos já conhecidos.

Os registos astronómicos mais antigos datam de aproximadamente 3000 a.C. e devem-se aos chineses, babilónios, assírios e egípcios. Naquela época, os astros eram estudados com objectivos mais relacionados com a Astrologia, como fazer previsões do futuro, ou com objectivos práticos como medir a passagem do tempo (calendários) para melhor prever a época para o plantio e a colheita.

Vários séculos antes de Cristo, os chineses sabiam da duração do ano e usavam um calendário de 365 dias. Deixaram registos de anotações precisas de cometas, meteoros e meteoritos desde 700 a. C. . Mais tarde, também observaram estrelas a que agora chamamos novas.

Os babilónios, assírios e egípcios também sabiam da duração do ano desde épocas pré-cristãs. Noutras partes do mundo, foram deixadas várias evidências de conhecimentos astronómicos na forma de monumentos, como o de Stonehenge, na Inglaterra, que data de 2500 a 1700 a C.. Nesta estrutura, algumas pedras estão alinhadas com o nascer e o pôr do Sol no início do Verão e do Inverno.



Figura 1. 1 Monumento de Stonehenge
Adaptada de http://pcastro7.if.ufrgs.br/index.htm

Os Maias, na América Central, também tinham conhecimentos de calendário e de fenómenos celestes, e os polinésios aprenderam a navegar por meio de observações celestes.

O impulso da ciência antiga, aconteceu na Grécia, de 600 a.C. a 400 d.C, a níveis só ultrapassados no século XVI.



Figura 1. 2 Imagem de Atenas antiga
Adaptada dehttp://pcastro7.if.ufrgs.br/index.htm

Do esforço dos gregos em conhecer a natureza do cosmos, e com o conhecimento herdado dos povos mais antigos, surgiram os primeiros conceitos de Esfera Celeste, uma esfera de material cristalino, incrustada de estrelas, tendo a Terra no centro. Não conhecendo a rotação da Terra, os gregos imaginaram que a esfera celeste girava em torno de um eixo passando pela Terra. Observaram que todas as estrelas giram em torno de um ponto fixo no céu e consideraram esse ponto como uma das extremidades do eixo de rotação da esfera celeste.

Há milhares de anos que os astrónomos sabem que o Sol muda a sua posição no céu ao longo do ano, movendo-se um grau para leste por dia. O tempo que o Sol demora a completar uma volta na esfera celeste define um ano. O caminho aparente do Sol no céu durante o ano define a eclíptica (assim chamada porque os eclipses ocorrem só quando a Lua está próxima da eclíptica).

Como a Lua, os planetas percorrem o céu numa região de dezoito graus centrada na eclíptica. Essa região é definida como o Zodíaco é dividida em doze constelações, algumas das quais com formas de animais (actualmente as constelações do Zodíaco são treze).

As constelações são grupos aparentes de estrelas. Os antigos gregos, os egípcios e os chineses, já tinham dividido o céu em constelações.

1.2.2 Os astrónomos da Grécia antiga

Tales de Mileto (~624-546 a.C.) introduziu na Grécia os fundamentos da geometria e da astronomia, trazidos do Egipto. Pensava que a Terra era um disco plano sobre uma vasta extensão de água.

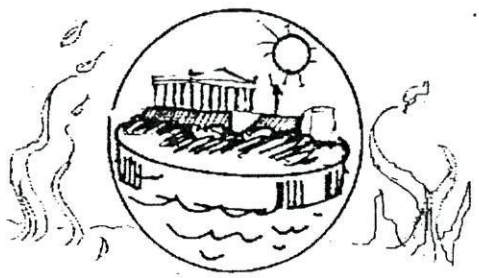


Figura 1. 3 Visão grega do Mundo

Pitágoras de Samos (~572-497 a.C.) acreditava na esfericidade da Terra, da Lua e de outros corpos celestes. Achava que os planetas, o Sol, e a Lua eram transportados por esferas separadas da que carregava as estrelas.

Aristóteles de Estagira (384-322 AC) explicou que as fases da Lua dependem de quanto da face da Lua, iluminada pelo Sol, está voltada para a Terra. Explicou também os eclipses: um eclipse do Sol ocorre quando a Lua passa entre a Terra e o Sol; um eclipse da Lua ocorre quando a Lua entra na sombra da Terra. Aristóteles argumentou a favor da esfericidade da Terra, já que a sombra da Terra na Lua durante um eclipse lunar é sempre arredondada. Afirmava que o Universo é esférico e finito.

Aristarco de Samos (310-230 a.C.) foi o primeiro a em volta do Sol, antecipando Copérnico em quase 2 desenvolveu um método para determinar as distânci Terra e mediu os tamanhos relativos do Sol e da Lua

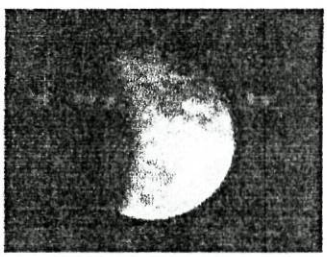


Figura 1. 4 A Lua
Adaptada de
http://pcastro7.if.ufrgs.br/index.htm

Eratóstenes de Cirênia (276-194 a.C.), bibliotec Alexandrina de 240 a.C. a 194 a.C., foi o primeiro a medir o diâmetro da Terra. Ele notou que na cidade egípcia de Siena (actualmente chamada de Aswân), no

primeiro dia do verão a luz atingia o fundo de um grande poço, ao meio-dia, ou seja o Sol estava incidindo perpendicularmente à Terra em Siena.

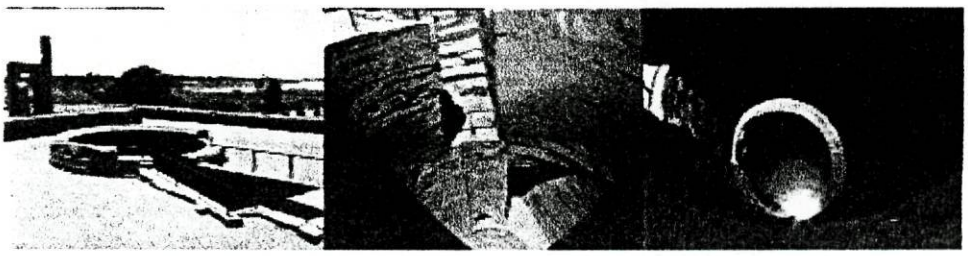


Figura 1. 5 Imagens do poço de Siena, ainda existe actualmente
Adaptada de http://pcastro7.if.ufrgs.br/index.htm

Já em Alexandria, situada ao Norte de Siena, isso não ocorria. Alexandria está a 5000 estádios ao norte de Siena (um estádio é uma unidade de distância usada na Grécia antiga). Esta distância equivale à distância de 50 dias de viagem de camelo, que viaja a 16 km/dia. Medindo o tamanho da sombra de um bastão na vertical, Eratóstenes observou que, em Alexandria, no mesmo dia e hora, o Sol não estava directamente no zénite, mas aproximadamente 7 graus mais ao sul. Como 7 graus corresponde a 1/50 de um círculo (360 graus), Alexandria deveria estar a 1/50 da circunferência da Terra ao norte de Siena, e a circunferência da Terra deveria ser 50x5000 estádios. Infelizmente não é possível ter certeza do valor do *estádio* usado por Eratóstones, já que os gregos usavam diferentes tipos de *estádios*. Se ele utilizou um estádio equivalente a 1/6 km, o valor está a 1% do valor correcto de 40 000 km. O diâmetro da Terra é obtido dividindo-se a circunferência por π.

Hiparco de Nicéia (160-125 a.C.) considerado o maior astrónomo da era pré-cristã, construiu um observatório na ilha de Rhodes, onde fez observações durante o período de 160 a 127 AC. Como resultado ele compilou um catálogo com a posição no céu e a *magnitude* de 850 estrelas. A magnitude, que especificava o brilho da estrela, era dividida em seis categorias, de 1 a 6, sendo 1 a mais brilhante, e 6 a mais fraca visível a olho nu. Hiparco deduziu correctamente a direcção dos pólos celestes, e até mesmo a *precessão*, que é a variação da direcção do eixo de rotação da Terra devido à influência gravitacional da Lua e do Sol, que leva 26 000 anos para completar um ciclo. Para deduzir a precessão, ele comparou as posições de várias estrelas com aquelas catalogadas por Timocharis e Aristyllus 150 anos antes (cerca de 300 a.C.). Estes eram membros da Escola de Alexandria do século III a.C. e foram os primeiros a medir as distâncias das estrelas de pontos fixos no céu (coordenadas eclípticas). Foram, também os primeiros a trabalhar na

Biblioteca de Alexandria, que se chamava Museu, fundada pelo rei do Egipto, Ptolémée Sôter Ier, em 305 a.C..

Hiparco também deduziu o valor correcto de 8/3 para a razão entre o tamanho da sombra da Terra e o tamanho da Lua, e também encontrou que a Lua estava a 59 vezes o raio da Terra de distância; o valor correcto é 60. Ele determinou a duração do ano com uma precisão de 6 minutos.

Cláudio Ptolomeu (85d.C. e 165d.C. foi o último astrónomo importante da antiguidade. Compilou uma série de 13 volumes sobre astronomia, conhecido como o Almagesto, que é a maior fonte de conhecimento sobre a astronomia na Grécia. A contribuição mais importante de Ptolomeu foi uma representação geométrica do sistema solar, com círculos e epiciclos, que permitia predizer o movimento dos planetas com considerável precisão, e que foi usado até o Renascimento, no século XVI.



Figura 1. 6 Cláudio Ptolomeu
Adaptada de
http://pcastro7.if.ufrgs.br/index.htm

Capítulo 2 - O Sistema Solar

2.0 Introdução

Neste capítulo apresenta-se a constituição do sistema solar, caracterizando os seus componentes bem como o estudo dos seus movimentos.

2.1 Características gerais do Sistema Solar

Mergulhei no futuro, tão longe quanto os olhos humanos conseguem ver; vi a visão do mundo, e toda a maravilha que podia ser. -Alfred Lord Tennyson, 1842

O Sistema Solar tem como elemento principal uma estrela anã e amarela com cerca de cinco biliões de anos de idade - o Sol - em seu redor encontramos, planetas, satélites, meteoróides, asteróides e cometas distribuídos numa extensa região de quase vinte biliões de quilómetros. Da nuvem estelar que deu origem à nossa estrela e demais corpos à mais de cinco biliões de anos atrás, 99,9% da sua massa formou o Sol e os restantes 0,1% pertencem aos restantes corpos do Sistema Solar. O estudo do Sistema Solar, permitiu-nos conhecer o nosso Sol e a exploração planetária trouxe à Humanidade uma nova visão deste conjunto pelo estudo comparativo entre planetas. O planeta Terra ocupa uma situação muito especial por ter permitido a manutenção de formas de vida por períodos muito longos, situação essa que não encontramos nos restantes planetas. Entender o Sistema Solar significa valorizar a Terra e como nos devemos comportar para permitir uma existência profícua dela.

De seguida veremos as características dos componentes do Sistema Solar. O objectivo é conseguir alguma compreensão dele, a partir de uma série de comparações com base no conhecimento actual sobre o nosso planeta Terra e o nosso satélite natural - a Lua, pois são os dois corpos celestes acerca dos quais há um maior número de informações disponíveis. Enquadram-se como características dos planetas e satélites: as suas atmosferas, superfícies,

composições químicas, estruturas. Quanto ao comportamento podemos considerar as suas: localizações no sistema solar, órbitas e movimentos (translação, rotação, precessão, etc.).

Os Planetas são corpos celestes que orbitam uma estrela e cuja massa não é suficiente para gerar energia, como, acontece com as estrelas. Os planetas e luas, são muito menos massivos que as estrelas. As estrelas geram a sua própria luz, enquanto os planetas e luas não têm massa suficiente para iniciarem as reacções de fusão. Os planetas e as luas brilham por reflexão da luz das estrelas. Note-se que a medida do raio não permite diferenciar um planeta de uma estrela, pois existem estrelas de raio reduzido e massa muito superior à de um planeta. Por exemplo, uma anã branca, que possui um raio igual ao da Terra, tem a sua massa estimada em cerca de 300.000 vezes a massa terrestre.

Como sabemos, ao olhar para o céu, o que é um planeta ou uma estrela? Existem duas diferenças básicas entre planetas e estrelas, que podem ser identificadas por qualquer pessoa com pouca experiência no assunto.
A primeira é que o planeta não cintila como as estrelas. Este facto é devido a que as estrelas encontram-se a elevada distância, sendo por isso consideradas fontes de luz pontuais, os planetas como estão mais próximos vemo-los como pequenos discos, ao invés de simples pontos luminosos. Quando a luz proveniente das estrelas passa por ar mais denso e depois menos denso, parece cintilar. Nos planetas a luz proveniente de todas as partes dos disco também continua a curvar-se, mas a intensidade total não muda significativamente. É claro que existem no céu estrelas que parecem não cintilar, principalmente aos olhos de quem não está acostumado a observá-las. Nesse caso entra a segunda diferença. Quando se observar um objecto no céu e se suspeitar que é um planeta, mas não se tem a certeza, faça-se o seguinte: Fixe-se algumas referências utilizando as estrelas em seu redor, de preferência faça-se um desenho em escala assinalando o objecto a ser observado, e observe-se por uns vinte ou vinte e cinco dias. Se esse objecto mudar de posição em relação ás referências, esse objecto será certamente um planeta. Podemos colocar o problema desta forma, pois para pequenos intervalos de tempo, podemos considerar as estrelas como fixas, já que mantêm as suas posições relativas no

céu por décadas, mas os planetas não. Os planetas, como a tradução da palavra diz, errante, movimentam-se na esfera celeste próximo da eclíptica. A eclíptica é a órbita que o Sol aparenta ter, ao longo do ano, em torno da Terra.

O nosso sistema solar consiste no Sol e nos planetas Mercúrio, Vénus, Terra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano, Neptuno e Plutão. Inclui ainda os satélites dos planetas, numerosos cometas, asteróides e meteoróides e o espaço interplanetário. O Sol é a fonte mais rica de energia electromagnética do sistema solar. A estrela conhecida mais próxima do Sol é uma estrela anã vermelha, chamada Próxima Centauri, à distância de 4.3 anos-luz.

Os planetas, a maior parte dos seus satélites e os asteróides giram em volta do Sol, na mesma direcção, em órbitas aproximadamente circulares (elipses), movimento de translação. Se olharmos por cima do pólo norte solar, os planetas orbitam num sentido anti-horário. Os planetas orbitam o Sol quase todos num mesmo plano, chamado a *eclíptica*. Plutão é um caso especial, porque a sua órbita é a mais inclinada (18 graus) e a mais elíptica de todos os planetas. Por isso, durante uma parte da sua órbita, Plutão está mais perto do Sol do que Neptuno. O eixo de rotação da maior parte dos planetas é aproximadamente perpendicular à eclíptica. As excepções são Urano e Plutão, que estão inclinados para um lado. Os planetas também executam um movimento sobre si próprios, que designamos por rotação. Estes dois movimentos estão na origem de diferenças a nível dos planetas, como a duração do dia e do ano.

Os planetas do Sistema Solar são divididos habitualmente em dois grupos: Os quatro primeiros a partir do Sol são os planetas terrestres, telúricos ou interiores (Mercúrio, Vénus, Terra e Marte) e os quatro seguintes são os planetas jovianos ou exteriores (Júpiter, Saturno, Urano e Neptuno).

Como Plutão se encontra a grande distância e consequentemente há carência de dados não se lhe pode dar uma classificação correcta, mas ao que parece enquadra-se nos planetas do tipo terrestre. Os parâmetros de maior importância para essa divisão são os seguintes:

Os planetas terrestres apresentam: massa pequena, grande densidade, pequena distância do Sol, poucos ou nenhum satélite e são compostos de elementos pesados.

Os planetas jovianos apresentam: grande massa, pequena densidade, grande distância do Sol, muitos satélites e são compostos de elementos leves, principalmente hidrogénio e hélio.

Além dos planetas, entre as órbitas de Marte e Júpiter encontramos o Cinturão de Asteróides, uma série de pequenos corpos celestes, e além da órbita de Neptuno, o Cinturão Kuiper. O Cinturão de Kuiper gerou uma grande polémica relacionada com a questão de Plutão ser, ou não, um planeta! Por falta de maiores informações a respeito de Plutão e seu satélite Caronte, eles são mantidos na categoria de planetas. Pelas características dos objectos no Cinturão de Kuiper, deveremos no futuro ter a introdução de um novo termo de classificação dentro do sistema Solar que serão os Objectos Transneptunianos ou seja, objectos além da órbita de Neptuno.

Muito além do domínio dos planetas, temos a Nuvem de Oort, a fonte de cometas do nosso Sistema Solar. Para além dos corpos já descritos a família solar completa-se com outros corpos, de pequena dimensão, que estão na origem do fenómeno atmosférico frequentemente denominado de "Estrelas Cadentes". Formalmente elas são os Meteoros - na nossa atmosfera; Meteoróides - no espaço e Meteoritos - se encontrados na superfície terrestre. O conjunto Cometas, Asteróides e Meteoroídes são classificados como Corpos Menores do Sistema Solar.

2.1.1 Composição do Sistema Solar

O Sol contém 99.85% de toda a matéria do Sistema Solar. Os planetas, que se condensaram a partir do mesmo disco de matéria de onde se formou o Sol, contêm apenas 0.135% da massa do sistema solar. Júpiter contém mais do dobro da matéria de todos os outros planetas juntos. Os satélites dos planetas, cometas, asteróides, meteoróides e o meio interplanetário constituem os restantes 0.015%.

2.1.2 Espaço Interplanetário

Quase todo o sistema solar, em volume, parece ser um vazio completo. Longe de ser um nada absoluto, este "espaço" vácuo compõe o meio interplanetário. Inclui diversas formas de energia e pelo menos dois componentes materiais: poeira interplanetária e gás interplanetário. A poeira interplanetária consiste em partículas sólidas microscópicas. O gás interplanetário é um ténue fluxo de gás e de partículas carregadas, principalmente protões e electrões – plasma – que flui do Sol, o chamado vento solar.

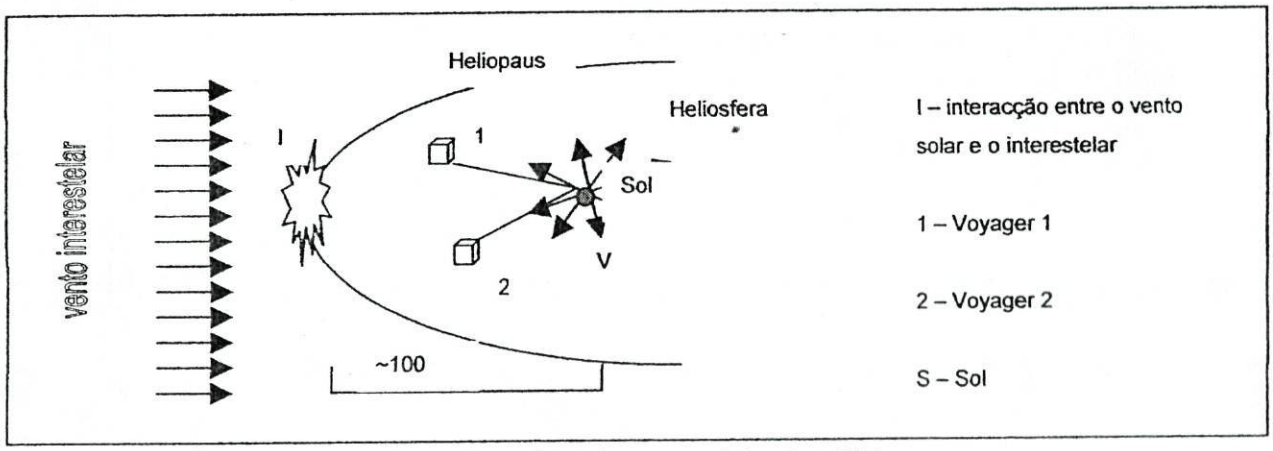


Figura 2.1 – Esquema do espaço interplanetário

O vento solar pode ser medido numa nave espacial, e tem um efeito importante sobre as caudas dos cometas. Também tem um efeito mensurável no movimento das naves espaciais. A velocidade do vento solar é cerca de 400 quilómetros por segundo nas proximidades da órbita da Terra. O ponto em que o vento solar atinge o meio interestelar, que é o vento "solar" de outras estrelas, é denominado heliopausa. É uma fronteira teórica, aproximadamente circular, ou em forma de lágrima, que marca o limite da influência solar, talvez a 100 UA do Sol. O espaço entre os limites da heliopausa, que contém o Sol e os planetas solares, é denominado heliosfera.

O campo magnético solar estende-se para além do espaço interplanetário; pode ser medido na Terra e por naves espaciais. O campo magnético solar é o campo magnético dominante em todas as regiões interplanetárias do sistema solar, excepto nas imediações dos planetas que têm os seus próprios campos magnéticos.

2.1.3 Os Planetas Terrestres

Os planetas terrestres são os quatro planetas mais interiores no sistema solar, Mercúrio, Vénus, Terra e Marte. São denominados de terrestres, porque têm uma superfície compacta rochosa tal como a Terra. Os planetas Vénus, Terra e Marte têm atmosferas significativas enquanto que em Mercúrio a mesma é quase inexistente. O diagrama seguinte mostra a distância aproximada dos planetas terrestres ao Sol.

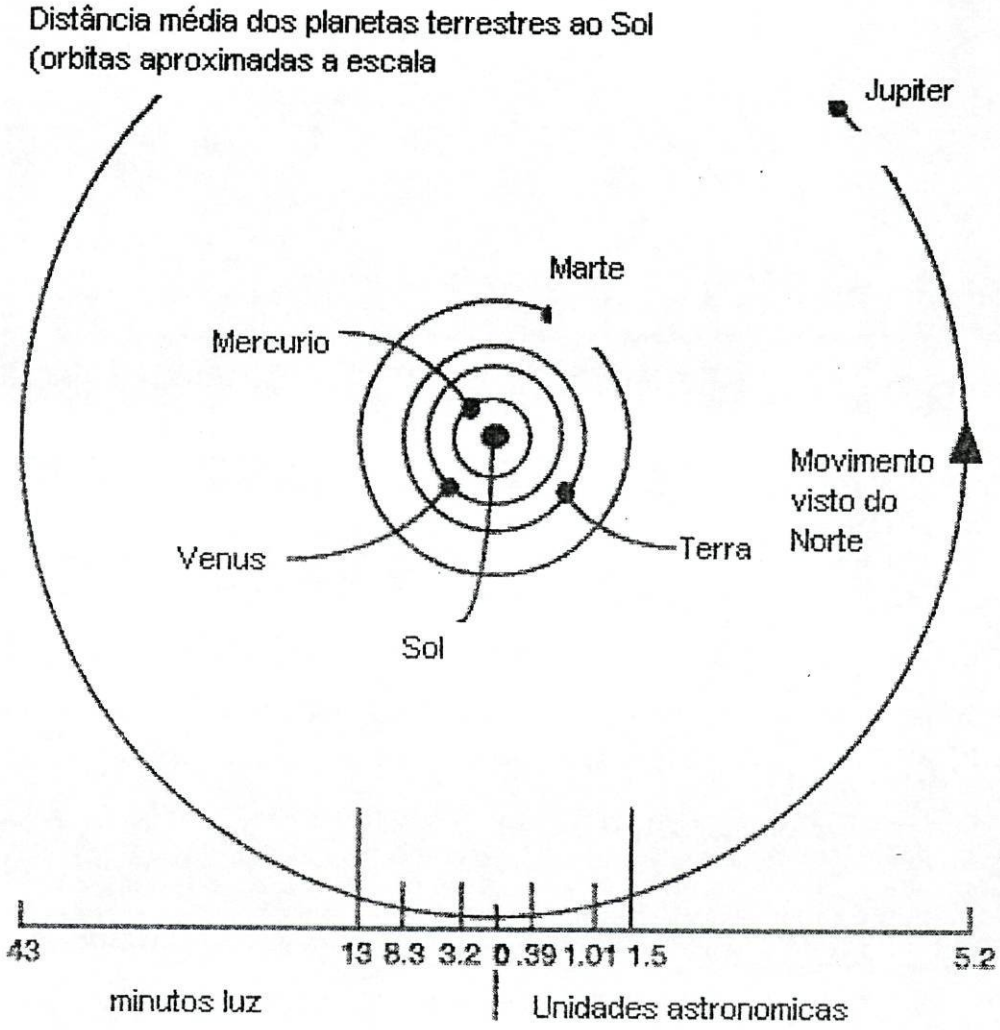


Figura 2.2 – Distâncias médias dos planetas terrestres ao Sol

2.1.4 Os Planetas Jupiterianos

Júpiter, Saturno, Urano e Neptuno são conhecidos por planetas Jupiterianos, ou Jovianos (semelhantes a Júpiter, ou Jove), porque são todos gigantescos comparados com a Terra, e têm uma natureza gasosa, tal como Júpiter. Os planetas Jovianos também são referidos como os *gigantes gasosos*, apesar de

alguns, ou todos, poderem possuir pequenos núcleos sólidos. O diagrama seguinte mostra a distância aproximada dos planetas Jovianos ao Sol

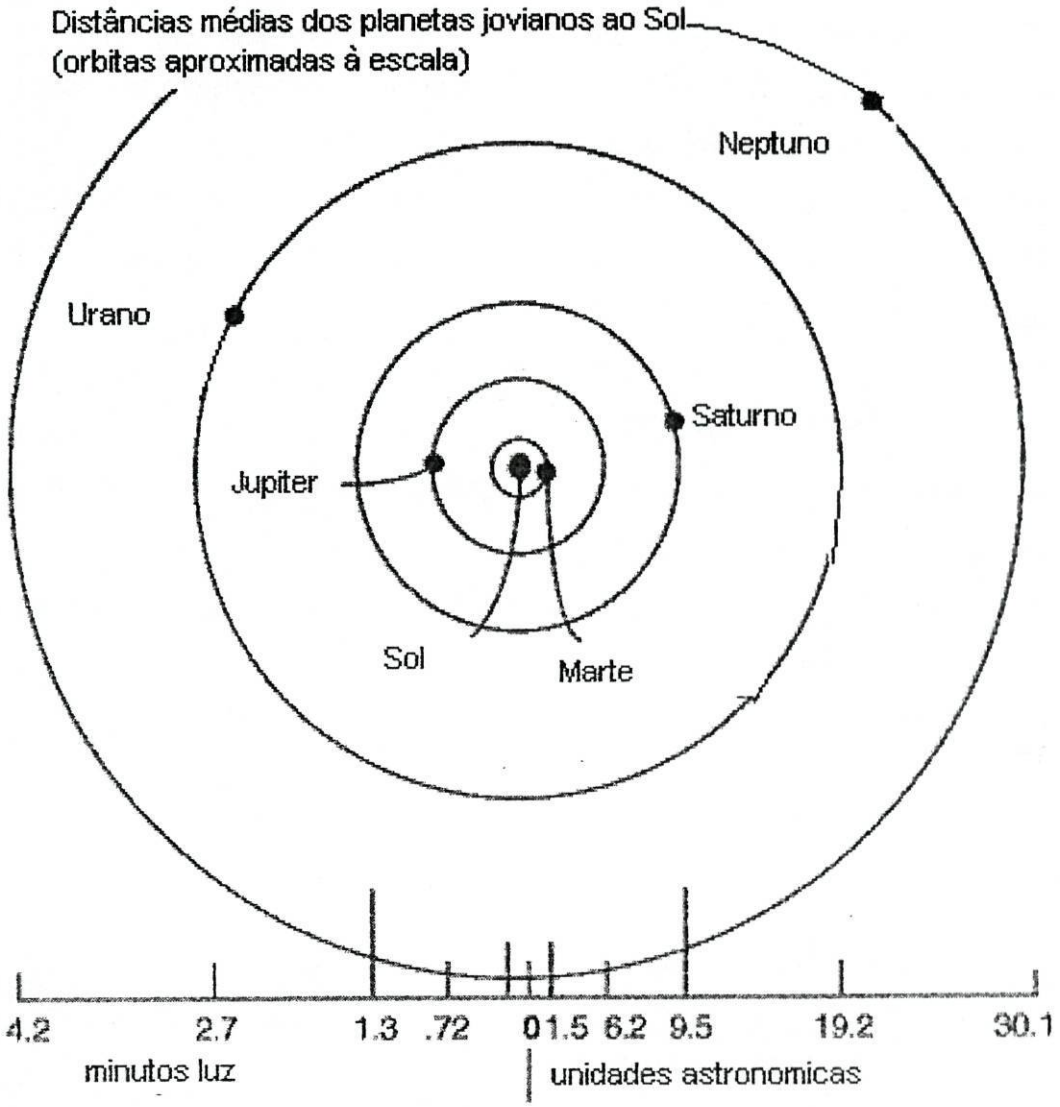


Figura 2.3 – Distâncias médias dos planetas jovianos ao Sol

2.2 Origem do Sistema Solar

2.2.1. Características unificadoras do Sistema Solar

O sistema solar apresenta várias características que o unificam.

As órbitas dos planetas são quase coplanares e paralelas ao equador solar.

As órbitas são quase circulares.

Os planetas orbitam o Sol no sentido anti-horário (direcção de rotação do Sol).

Os planetas e o Sol têm rotação no sentido anti-horário sobre os seus eixos (excluindo Vénus, Urano e Plutão).

Os planetas têm cerca de 98% do momento angular do sistema solar, mas apenas 0,15% da massa total.

Os planetas terrestres exibem diferenças físicas e químicas dos planetas jupiterianos.

A estrutura dos sistemas de satélites naturais dos planetas é semelhante a um sistema solar em miniatura.

As distâncias dos planetas ao Sol obedecem aproximadamente à lei empírica de Bode; onde o semi-eixo maior, a, está expresso em U.A.;

$$a = 0.4 + 0.3 \times 2^n \quad \text{onde } n = -\infty, 0, 1, 2, 3, \ldots$$

n	Lei de Bode U.A.	Planeta	Distância verdadeira U.A.
- ∞	0.4	Mercúrio	0.39
0	0.7	Vénus	0.72
1	1.0	Terra	1.00
2	1.6	Marte	1.52
3	2.8	?	-
4	5.2	Júpiter	5.20
5	10.0	Saturno	9.54
6	19.6	Urano	19.18
7	38.8	Neptuno	30.06
8	77.2	Plutão	39.44

2.2.2 Teorias de formação do Sistema Solar

A regularidade destas características sugere que todo o sistema tenha sido criado por um processo único. Mas qual terá sido então o processo que criou o sistema solar?

Uma das primeiras teorias defendia que os planetas do sistema solar teriam tido origem na colisão entre duas estrelas, sendo estes o resultado da matéria expelida pelo choque. Esta teoria foi sendo rejeitada à medida que as características dos planetas que constituem o sistema solar foram conhecidas. Os principais obstáculos a esta teoria foram:

- o facto de não explicar a razão porque as órbitas dos planetas são tão próximas de circunferências (no caso de resultarem da matéria expulsa de uma colisão as suas órbitas deveriam demorar muitos milhões de anos até atingirem órbitas circulares);
- sendo a distância às estrelas que constituem a nossa galáxia tão grande, a probabilidade de colisão entre duas estrelas é ínfima. Isso significaria que a probabilidade de existência de outros sistemas planetários como o nosso seria também muito pequena, o que iria contra o conhecimento de que existem diversos sistemas planetários na nossa galáxia.

De acordo com a teoria actualmente aceite, os sistemas solares formam-se a partir de nuvens de material interestelar que adquirem movimento de rotação antes de iniciarem o seu colapso gravitacional em direcção à parte central. Devido às forças gravitacionais entre as suas partes constituintes, a matéria das nuvens interestelares (poeiras e gases) tende a aglomerar-se na sua parte central; nesse processo gradual de captação de matéria, começa por se formar um nódulo central que, aumentando progressivamente de massa, vai colectando a matéria circundante. Na nossa Galáxia, por exemplo, existem extensas regiões ocupadas por nuvens interestelares, constituídas por gases e poeiras, onde permanentemente vão nascendo novas estrelas e, quase de certeza, outros sistemas solares. Assim, o nosso Sol e outras estrelas formaram-se a partir de matéria com constituição semelhante, sendo predominante o hidrogénio (quase oitenta por cento a massa total), o hélio, com cerca de vinte por cento, e apenas vestígios de outros elementos.

Enquanto se dá o colapso da parte interior da nuvem interestelar, as regiões exteriores tomam a forma de um disco, também em rotação, sendo aqui a temperatura muito mais baixa que nas proximidades do centro. Nesta fase já se pode falar de uma nuvem protossolar, pois ela é o embrião de um sistema onde, na parte central, um sol está a nascer. Outros nódulos de matéria, já afastados de centro, vão-se também formando, muito provavelmente por aumento progressivo das dimensões dos pequenos grãos de poeira da nuvem inicial, num processo de aglomeração devido às forças gravitacionais. A rotação da nuvem protossolar faz com que os materiais menos densos sejam atirados para a periferia, onde facilmente congelam devido às baixas temperaturas a que passam a estar expostos.

Entretanto, a acumulação de material em torno dos referidos nódulos dá origem ao seu crescimento contínuo, até atingirem dimensões consideráveis. Nesta fase podem já ser considerados os embriões de futuros planetas e são, por isso, chamados planetésimais. À medida que este processo continua, a existência de uma certa instabilidade, resultante das influências da gravidade, deve facilitar as colisões entre planetésimais e a fragmentação de muitos deles, enquanto outros se vão formando. Quando estes planetas primordiais se tornaram bastante grandes, começaram a acretar gás e poeira da nuvem circundante. Das condensações menores orbitando estes proto-planetas, formaram-se as luas. Perturbações mútuas impediram que os planetésimos no cinturão de asteróides chegassem a crescer até ao tamanho de planetas.

Após este período turbulento vai-se estabelecendo uma certa harmonia, ficando bem definidos os locais em que cada planeta vai poder formar-se, bem como as regiões em que nascerão os planetas constituídos pelos elementos mais pesados ou mais leves, de acordo com a sua maior ou menor proximidade à parte central. Os elementos leves evaporam do Sistema Solar interior. A massa do Sol primordial estava concentrada num disco no plano da eclítica e o Sol perdia o momento angular para o gás circundante através das linhas de campo magnético. A formação dos planetas chegou ao fim quando começaram a ter lugar reacções nucleares no interior do Sol. O vento solar transportou consigo momento angular, e como resultado temos o Sol a rodar lentamente. O vento solar também "varreu" para fora do sistema solar o gás e poeira excedentes, determinado assim o fim da fase de acreção, 100 milhões de anos depois.

2.3 Modelos do Sistema Solar

O estudo do Universo e o aumento dos conhecimentos sobre este ao longo da história, motivaram o desenvolvimento de diferentes teorias para a constituição do sistema solar e para os movimentos dos planetas. Assim existiram duas teorias principais que procuraram explicar a constituição do sistema solar: o modelo geocêntrico e o modelo heliocêntrico.

2.3.1 O modelo geocêntrico

Apesar da dificuldade de compreender e explicar o movimento observado dos planetas do ponto de vista geocêntrico (a Terra no centro do Universo), o geocêntrismo foi uma ideia dominante na Astronomia durante toda a Antiguidade e Idade Média. O sistema geocêntrico também é conhecido como sistema ptolomaico, pois foi Cláudio Ptolomeu, o último dos grandes astrónomos gregos (150d.c.), quem construiu o modelo geocêntrico mais completo e eficiente. Os planetas eram colocados em esferas, em volta da Terra, pela ordem seguinte: Lua, Mercúrio, Vénus, Sol, Marte, Júpiter e Saturno. Todas as esferas, à excepção da primeira e da última, tinham movimentos bastante complexos, já que eram animadas de movimentos de rotação em torno de vários eixos. Ptolomeu explicou o movimento dos planetas através da combinação de círculos: o planeta move-se num circulo chamado epiciclo, cujo centro se move num circulo maior chamado deferente. A Terra fica numa posição um pouco afastada do centro do deferente (o eferente é um círculo excêntrico em relação à Terra). Para dar conta do movimento não uniforme dos planetas, Ptolomeu introduziu ainda o equanto, que é um ponto ao lado do centro do deferente oposto à posição da Terra, em relação ao qual o centro do epiciclo se move a taxa uniforme.

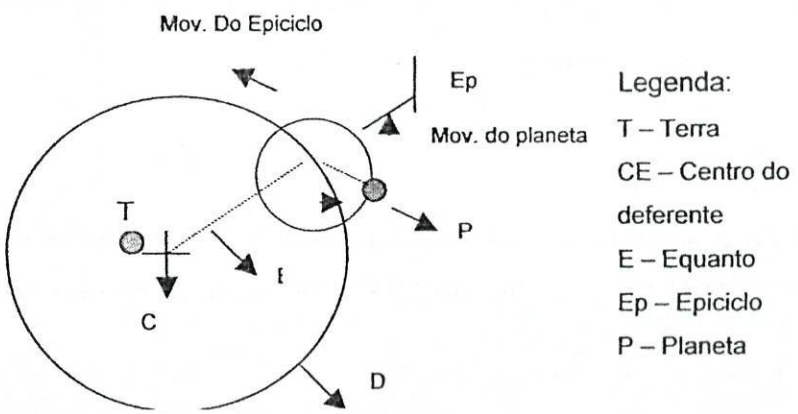


Figura 3.4 – Esquema representando o sistema geocêntrico de Ptolomeu. A utilização de epiciclos ou a colocação da Terra em posições descentradas, ou ainda a utilização de equantos, tinham por objectivo reproduzir, o mais exactamente possível, os movimentos observados para os diversos planetas do Sistema Solar

O objectivo de Ptolomeu era produzir um modelo que permitisse prever a posição dos planetas de forma correcta, e nesse ponto ele foi bem sucedido. Por essa razão esse modelo continuou a ser usado sem mudanças substanciais por 1300 anos.

2.3.2 O modelo heliocêntrico

A revolução iniciada por Copérnico foi acima de tudo uma revolução intelectual, a qual, com a proposta de que o Sol se situa no centro do sistema solar e de que a Terra orbita à sua volta, aboliu a velha ideia de um Universo antropocêntrico, centrado na Terra. Copérnico teve o ensejo de em 1504 poder observar um fenómeno raro: uma conjunção da Lua e dos cinco planetas conhecidos na época, conjunção esta que colocava aqueles seis astros na região da constelação de Cancer. Concluiu que as posições observadas para aqueles planetas se afastavam, em alguns graus, das posições que eram previstas utilizando o modelo de Ptolomeu.

Copérnico, na elaboração do seu modelo heliocêntrico, admitiu um certo número de hipóteses, das quais se destaca:

- O centro da Terra não é o centro do Universo, mas apenas o centro da órbita da Lua.
- Todas as esferas planetárias se movem em torno do Sol, pelo que o Sol tem uma posição central no Universo
- A distância da Terra ao Sol é extremamente pequena, comparada com a distancia às estrelas.
- Qualquer movimento diurno aparente nos céus não tem a sua origem no movimento do firmamento, sendo sim uma consequência do movimento de rotação da Terra
- A Terra move-se em torno do Sol como qualquer outro planeta, e tem portanto mais do que um movimento.

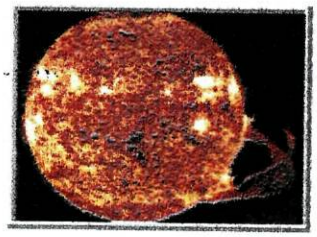
Copérnico utilizou o modelo heliocêntrico para obter resultados importantes:

- Calculou o período de rotação de cada planeta em torno do Sol, tendo para este cálculo utilizado observações que tinham sido registadas ao longo de vários séculos.

- Calculou igualmente as dimensões das órbitas de cada planeta relativamente à dimensão da órbita da Terra.
- Deduziu que quanto mais perto do Sol está um planeta, maior é a sua velocidade orbital. Dessa forma explicou o movimento retrógrado dos planetas.
- Colocou os planetas em ordem de distância ao Sol: Mercúrio, Vénus, Terra, Marte, Júpiter, Saturno.
- Determinou as distâncias dos planetas ao Sol, em termos da distância Terra-Sol.

2. 4 Os principais elementos do Sistema Solar:

2.4.1 O Sol



A Humanidade não ficará na Terra para sempre, mas na sua busca de luz e espaço irá primeiro timidamente penetrar para lá dos confins da atmosfera, e mais tarde conquistar para si própria todo o espaço perto do Sol. - Konstantin E. Tsiolkovsky (1857-1935)

O Sol é a estrela mais próxima de nós. Todos os planetas do sistema solar giram ao seu redor, cada um com um período diferente. Ele é o responsável pelo suprimento de energia da maioria dos planetas. Quando as pessoas visitam observatórios as perguntas mais comuns que surgem a respeito do Sol são: o que é o Sol e como ele funciona? De que é que ele é feito?

O Sol só é uma estrela por causa da grande quantidade de massa que tem, 334.672 vezes a massa da Terra. É constituído, principalmente pelos gases hidrogénio e hélio, os dois gases mais leves existentes. Quando se diz que o Sol tem quase 98% de H e He a pergunta mais comum que aparece é: como é possível o Sol ter tanta massa, sendo formado fundamentalmente por esses dois elementos? Para a responder é necessário compreender as teorias de formação do sistema solar.

2.4.1.1 Localização

O Sol ocupa uma posição periférica na nossa Galáxia, ou seja, está a 33.000 anos luz do centro galáctico, o que corresponde a 2/3 do raio galáctico. Nós estamos num dos braços espirais, o braço de Orion, como mostra o esquema a seguir.

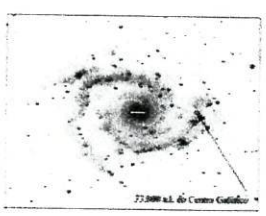


Figura 2.6 Localização do Sol na Galáxia. Retirada de http://www.solarviews.com[3]

[3] Algumas das imagens utilizadas neste capítulo foram obtidas em http://www.solarviews.com. Nas legendas não será sempre referenciado este facto pelo motivo de serem facilmente identificáveis.

O Sol também está a orbitar em relação ao centro gravitacional da nossa Galáxia. O ano do Sol é de aproximadamente 230 milhões de anos terrestres e a sua velocidade orbital é de 250 km/s, tendo todos os demais corpos do Sistema Solar a acompanha-lo nessa viagem. Sabe-se que o Sol realizou cerca de 250 revoluções completas até hoje. A idade do Sol é de cerca de 4,5 biliões de anos.
A magnitude de uma estrela está relacionada com o seu brilho, quanto menor a magnitude maior será o seu brilho. O Sol tem magnitude absoluta igual a cinco.
O Sol, é uma estrela de quinta grandeza, é o principal componente do nosso Sistema Solar e é um dos milhões de Sóis existentes na nossa Galáxia. Se o Sol for colocado á distância de 32,6 anos-luz de nós, o seu brilho será semelhante ao de uma estrela de quinta magnitude.

2.4.1.2 Características Gerais

Pela Lei da Gravitação Universal de Isaac Newton (1642-1727), foi possível obter a massa da nossa estrela. Esta é estimada em cerca de 334.672 vezes a massa da Terra, equivalendo a 1.9 $x10^{30}$ kg, com um raio de 700.000 km . A sua densidade média é 1.4 g/cm3, pois a matéria não é homogénea no seu interior. A densidade no centro do Sol é muito maior, enquanto que nas camadas externas é muito inferior. O seu eixo de rotação tem uma inclinação em relação ao plano da eclíptica de 7° 15".
Apesar da sua massa ser centenas de milhares de vezes maior que a da Terra, a sua gravidade na superfície é apenas 28 vezes maior que a gravidade terrestre.
A temperatura na sua superfície é de cerca de 5770 K, e não sendo esta no estado sólida, mas sim gasosa.
O facto de o Sol ser basicamente um fluído permite que a sua superfície não rode como um corpo rígido. Em vez disso a sua rotação depende da latitude (chama-se por isso diferenciada) atingindo o seu máximo, de 2 Km/s, no equador. Esta velocidade, corresponde a um período de 25.03dias, decresce na direcção dos pólos com um período de 30 dias. O conhecimento da rotação diferenciada só foi inicialmente possível graças ao conhecimento das manchas solares. Esta está representada no esquema que se segue..

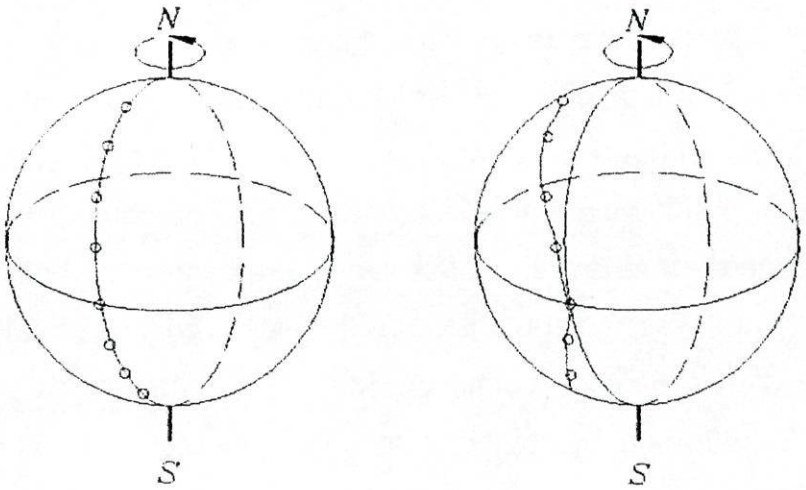


Figura 2.7 Esquema da Rotação Diferenciada
Retirada de http://www.solarviews.com

O Sol representa 99,867% de toda a massa do Sistema Solar, estando a restante dividida entre os planetas, asteróides, satélites, e cometas do Sistema Solar. A massa do Sol apresenta a seguinte distribuição:

Camadas Externas (Fotosfera e pouco abaixo)
0.2% de elementos pesados
7,8% de hélio
92% de hidrogénio

Tabela 2.1 Características Químicas do Sol.

Raio	700.000 km,	109 raios terrestres
Superfície	6,16 x10^{13} km^2	11.881 vezes a terrestre
Volume	1,44x 10^{18} km^3	1,3 10^6 vezes o terrestre
Massa	1,9 x10^{30} kg	334.672 vezes a terrestre
Densidade	1,4 g/cm^3	0,26 vezes a terrestre
Luminosidade	3,9 x10^{27} kW	———
Temperatura Superficial	5770 K	———
Temperatura no Centro	1,5x 10^7K	———
Gravidade Superficial	276 m/s^2	28 vezes a terrestre

Tabela 2.2 Características Físicas do Sol.

2.4.1.3 O funcionamento do Sol e a sua Estrutura Interna

Quando só se conheciam as reacções químicas (combustão) para a produção de fogo e calor, pensava-se que o Sol funcionava à custa destas, mas quando os astrónomos conseguiram calcular a sua massa e quantidade de energia necessária para mantê-lo aquecido constatou-se que, se assim fosse, ele não duraria mais de 100 anos. Como o Sol tem muito mais que 100 anos, a natureza deveria ter criado outra maneira, muito mais eficiente, de produzir energia. Só na primeira metade deste século é que se descobriu uma tal forma de produzir energia - a energia nuclear.
Para podermos imaginar o quanto esta reacção nuclear é poderosa vamos fazer a seguinte comparação. Se o Sol fosse formado pelo combustível mais eficiente que se conhece, que é o combustível usado no vaivém espacial, e todo o Sol fosse queimado, ele duraria cerca de 100 anos. Sendo movido a energia nuclear, apenas 1/3 do hidrogénio do Sol será consumido e mesmo assim os cientistas acreditam que ele irá funcionar por mais 5 biliões de anos. Considerando que ele já tem quase 5 biliões de anos, a vida do Sol será de aproximadamente 10 biliões de anos, ou seja, o Sol irá durar 100 milhões de vezes mais do que se fosse movido por energia química.

A energia solar é criada na zona profunda do núcleo, onde a temperatura é 15 milhões de graus Celsius e a pressão (340 biliões de vezes a do ar na Terra ao nível do mar) é tão intensa que permite a ocorrência de reacções nucleares. Esta reacção causa a fusão de quatro protões, ou núcleos de hidrogénio, para formar uma partícula alfa, ou núcleo de hélio. A partícula alfa é 0.7 por cento menos massiva que os quatro protões. A diferença em massa é expelida como energia e transportada para a superfície do Sol, onde é libertada em forma de luz e calor. A energia gerada no núcleo do Sol leva um milhão de anos a atingir a superfície. Em cada segundo 700 milhões de toneladas de hidrogénio são convertidas em *cinzas* de hélio. No processo são libertadas 5 milhões de toneladas de energia pura; assim, ao longo do tempo o Sol está a ficar cada vez mais leve. A cromosfera está acima da fotosfera. A energia solar passa por esta zona no seu caminho para fora do centro do Sol. Irrompem chamas e fáculas na cromosfera. Fáculas são nuvens de hidrogénio luminosas e brilhantes que surgem nas zonas em que as manchas solares estão prestes a formar-se. Chamas são filamentos

brilhantes de gás incandescente que emergem das zonas das manchas solares. Manchas solares são depressões escuras na fotosfera com uma temperatura típica de 4 mil graus Celsius.

NÚCLEO: No Sol a energia nuclear é produzida com o hidrogénio fazendo o papel de combustível. Sabendo como fazer a temperatura de um gás subir é possível entender como ocorrem as reacções nucleares no Sol. Sabemos que quando um gás é comprimido (pressionado) ele aquece. Perceber isso é fácil, basta encher um pneu de bicicleta usando uma bomba manual. O bico do pneu e a parte da bomba que está próxima do bico ficam bem aquecidos. Isso acontece porque o ar (gás) que está dentro da bomba é comprimido pela força que se faz. Quando o pneu fica quase cheio e se tem de fazer mais força, ou seja, comprimir mais ainda o ar, ele fica cada vez mais quente. Agora imagine-se o Sol onde a pressão é milhões de vezes maior do que a pressão na Terra. Sabemos também que a pressão aumenta com a profundidade. Mergulhando numa piscina com 2 ou 3 metros já percebemos o aumento da pressão nos nossos ouvidos. No Sol pode-se afundar até 50 vezes o diâmetro da Terra sem chegar ao seu centro, ficando até difícil imaginar a pressão que lá existe. Toda essa pressão faz com que o hidrogénio atinja temperaturas de 15 milhões de graus no centro do Sol. Com o gás nessas condições de temperatura e pressão é que podem ocorrem as reacções nucleares que mantêm o Sol aquecido. Tais reacções são milhões de vezes mais poderosas do que as reacções nucleares produzidas na Terra e são de natureza diferente. As reacções nucleares do Sol transformam o hidrogénio em hélio e nessa transformação é libertada uma enorme quantidade de energia.

Aqui na Terra recebemos uma pequenina parte da energia que o Sol produz. Somente no século XX é que se atingiu conhecimentos teóricos suficientes para elaborar uma teoria a respeito de toda a energia que o Sol irradia . Sabe-se que o Sol está actualmente em equilíbrio térmico (temperatura média aproximadamente constante), mas sabemos também que ele emite muita energia na forma de calor e luz. Porém para se manter esse equilíbrio é necessário uma fonte interna de energia. Essa fonte está no seu núcleo, que através de reacções termonucleares funde átomos de hidrogénio e forma átomos de hélio.

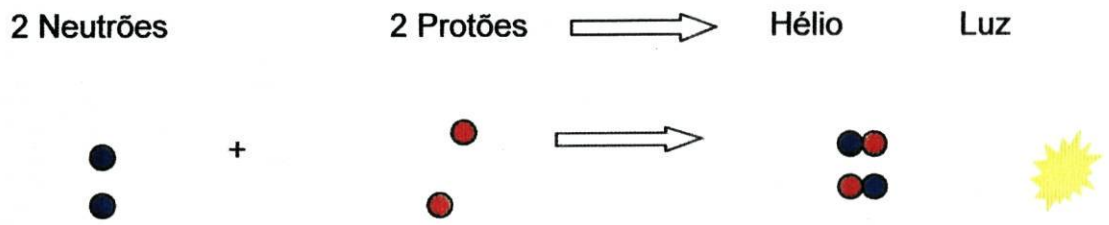


Figura 2.8 – Produção de energia por fusão

Em cada segundo são "usados" 700 mil milhões de toneladas de protões e é libertada energia suficiente para abastecer os Estados Unidos durante 7 milhões de anos ($3,8 \times 10^{23}$ W). Esta reacção iniciou-se há cerca de 5 000 milhões de anos e vai continuar por outros 5 000 milhões de anos. A nossa estrela parece ligeiramente amarelada porque a sua temperatura à superfície é cerca de 6 mil graus Celsius.

O núcleo está a uma temperatura de 15 milhões de Kelvin e a uma pressão da ordem de biliões de atmosferas, e esses valores vão decrescendo juntamente com a densidade, de modo não linear, conforme nos afastamos do mesmo, em direcção à superfície. A variação térmica (considerada do núcleo para as camadas mais externas) determina a estrutura interna da estrela. Esta depende do modo de propagação da energia. Os principais mecanismos de transporte energético encontrados no Sol são o radiactivo e o convectivo, esquematizados a seguir:

O RADIACTIVO: representado pela "Zona de Irradiação", é a camada do Sol onde a energia se propaga pelo processo radiactivo. Por isso não depende do meio para se propagar. O meio actua no sentido de atenuar a energia.
O CONVECTIVO: representado pela "Zona de Convecção", é a camada do Sol onde a energia se propaga através de movimentos convectivos, ou seja, a parte que está em contacto com a "Zona de Irradiação" é aquecida e, com isso, a sua densidade diminui e tende a subir para a superfície e o que está na superfície desce para entrar em contacto com a "Zona de Irradiação". Esse é o mesmo processo que ocorre com a água a ferver num recipiente em aquecimento.
Utilizando este processo, o Sol está a emitir energia desde sua ignição á 4,5 biliões de anos e os cálculos realizados indicam que ele emitirá energia da mesma forma por pelo menos mais 5 biliões de anos, que é quando estarão

esgotadas as reservas de hidrogénio no seu núcleo. É importante saber que a emissão de energia do Sol não é uniforme, ou seja, há variações no fluxo de energia emitida, que podem chegar, em casos excepcionais, a 5% do fluxo médio de energia, atribuindo-se o nome de "Sol calmo" quando ele se mantém no mínimo de emissão de energia e "Sol activo" quando está no máximo de emissão. Essas variações influenciam o meio interplanetário, na Terra observam-se muitos efeitos na atmosfera e no campo magnético.

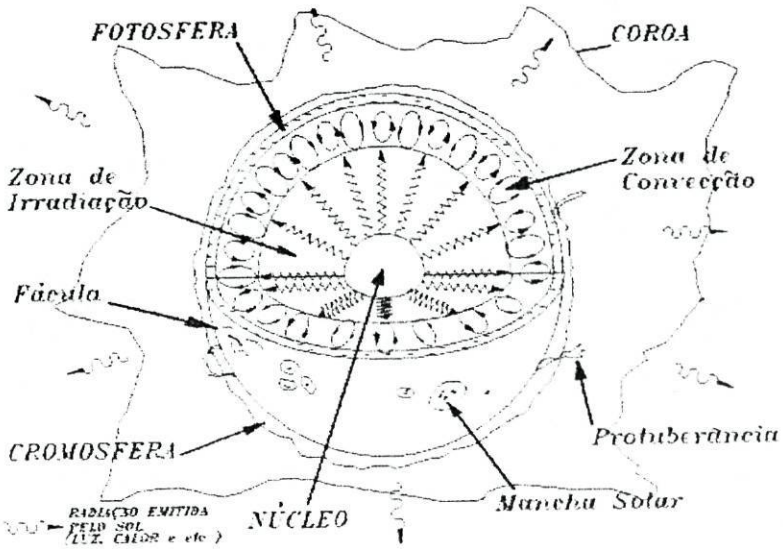


Figura 2.9 Esquema da Estrutura do Sol
Retirada de http://www.solarviews.com

2.4.1.5 Estrutura externa do Sol

FOTOSFERA: Aparentemente a olho nu e com instrumentos de baixa precisão a superfície solar é bastante uniforme. Na realidade ela é formada por pequenas estruturas hexagonais, os grânulos, de forma irregular e separadas por zonas mais escuras. Verificou-se que essas estruturas são topos de colunas ascendentes de gás aquecido, que ao arrefecer desce pelas zonas escuras vizinhas, decorrentes dos processos de convecção que misturam o gás nas camadas inferiores da fotosfera. Estima-se que a diferença de temperatura entre os grânulos e as zonas escuras é da ordem de 1000 K.

CROMOSFERA: É uma região externa à fotosfera. A temperatura na cromosfera decresce a partir da fotosfera até atingir 500 km de altitude com 4000 K e, aumentando novamente a partir daí até atingir 9000 K a altitude de 2000 km onde se inicia a coroa. Por muito tempo, a observação da cromosfera só foi

possível quando ocorriam eclipses totais que encobriam a luz fotosférica. Só há poucas décadas se desenvolveu um instrumento, o coronógrafo, que simula o eclipse solar total. Este é nada mais do que um telescópio preparado com filtros e obstáculos especiais que só permitem a passagem da luz da cromosfera e coroa.

COROA: É a camada mais impressionante e a mais extensa do Sol (abrange praticamente todo o Sistema Solar). A densidade da matéria nesta camada é cerca de 10 milhões de vezes menor que na fotosfera e diminui conforme se afasta do Sol. Em condições normais também não pode ser vista, pois a sua emissão de luz é um milhão de vezes menor que a luz da fotosfera. Pode ser visualizada em eclipses solares totais e com o coronógrafo. A Coroa pode ser distinguida em três regiões: coroa interna, coroa intermediária e coroa externa. Ao longo da translação terrestre, a Terra caminha imersa na coroa solar, e a radiação presente nela (oriunda do Sol) bombardeia continuamente o nosso planeta.

A coroa é a parte de fora da atmosfera solar. É a zona em que aparecem as *proeminências*. As proeminências são nuvens imensas de gás brilhante que emergem da cromosfera superior. A zona exterior da coroa alonga-se muito pelo espaço e consiste de partículas que se afastam lentamente do Sol. A coroa só pode ser vista durante um eclipse total do Sol.

O Sol parece estar activo desde há 4.6 biliões de anos e tem ainda combustível suficiente para continuar durante outros cerca de cinco biliões de anos. No fim da sua vida, o Sol iniciará a fusão do hélio em elementos mais pesados e começará a inchar, crescendo tanto que engolirá a Terra. Após um bilião de anos como gigante vermelha, irá subitamente colapsar numa anã branca -- o produto final de uma estrela como a nossa. Poderá ainda levar um trilião de anos até arrefecer completamente.

O período de rotação do Sol à superfície varia de aproximadamente 25 dias no equador a 36 dias nos pólos. Na profundidade, abaixo da zona de convecção, parece ter uma rotação com um período de 27 dias.

2.4.2 Mercúrio



Quando os homens atingem um objectivo, não deviam voltar para trás. - Plutarco

Mercúrio teve o seu nome atribuído pelos romanos, que assim o denominara por analogia com o mensageiro dos deuses, de asas nos pés, porque parecia mover-se mais depressa do que qualquer outro planeta. É o planeta mais próximo do Sol, e o segundo mais pequeno do sistema solar. O seu diâmetro é 40% mais pequeno do que o da Terra e 40% maior do que o da Lua. É até mais pequeno do que Ganímedes, uma das luas de Júpiter e Titã uma lua de Saturno.

Se um explorador andasse pela superfície de Mercúrio, veria um mundo semelhante ao solo lunar. Os montes ondulados e cobertos de poeira foram erodidos pelo constante bombardeamento de meteoritos. Existem escarpas com vários quilómetros de altura e centenas de quilómetros de comprimento. A sua superfície está ponteada de crateras. Visto de Mercúrio o Sol parece duas vezes e meia maior do que da Terra; no entanto, o céu é sempre negro porque Mercúrio praticamente não tem atmosfera suficiente para causar a dispersão da luz. Se deste planeta um explorador olhasse fixamente para o espaço, veria duas estrelas brilhantes: uma com tonalidade creme, Vénus, e a outra azul, a Terra.

Antes da Mariner 10, ter sido lançada pouco era conhecido sobre Mercúrio, por causa da dificuldade de o observar com os telescópios terrestres. Devido a estar apenas a 28 graus do Sol só pode ser visto durante o dia ou imediatamente antes do nascer - do – Sol, ou imediatamente depois do pôr - do - Sol. Quando observado ao amanhecer ou ao anoitecer, Mercúrio está tão baixo no horizonte, que a sua luz tem de passar através do equivalente a 10 vezes a camada da atmosfera terrestre, do que passaria se Mercúrio estivesse directamente por cima de nós.

Durante a década de 1880, Giovanni Schiaparelli criou um esquema onde mostrava algumas estruturas de Mercúrio. Ele concluiu que Mercúrio deveria estar "preso" ao Sol, (isto é, com a mesma face virada para ele), de modo a acompanhar o seu movimento, tal como a Lua está "presa" à Terra. Em 1962, radio - astrónomos estudaram as emissões rádio de Mercúrio e concluíram que o

suposto lado escuro, é mais do que seria de se estivesse sempre virado para o lado oposto ao Sol. Em 1965, Pettengill e Dyce calcularam o período de rotação de Mercúrio como sendo de 59 ± 5 dias, baseados em observações de radar. Mais tarde, em 1971, Goldstein melhorou o cálculo do período de rotação para 58.65 ± 0.25 dias, por meio de observações do radar. Após observações mais próximas, obtidas pela Mariner 10, o período foi definido como sendo de 58.646 ± 0.005 dias.

Apesar de Mercúrio não estar "preso" ao Sol, o seu período de rotação está relacionado com o seu período orbital. Mercúrio roda uma vez e meia por cada órbita. Por causa desta relação de 3:2, um dia em Mercúrio (desde o nascer do Sol até ao nascer do Sol do dia seguinte) dura 176 dias terrestres, conforme se mostra no diagrama seguinte.

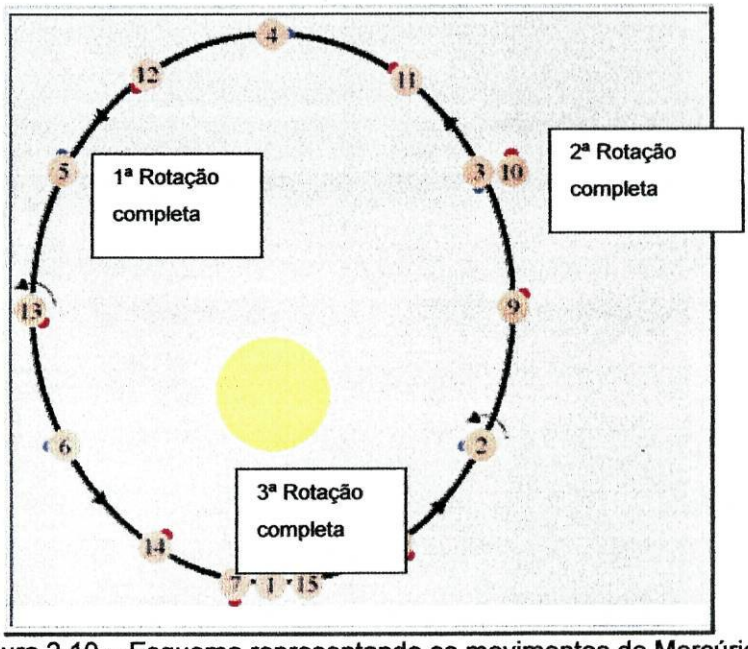


Figura 2.10 – Esquema representando os movimentos de Mercúrio

No passado distante de Mercúrio, o seu período de rotação deve ter sido menor. Os cientistas especularam que a rotação deve ter sido de cerca de 8 horas, mas ao longo de milhões de anos foi gradualmente retardado por influência do Sol. Um modelo deste processo mostra que este retardamento levaria 10^9 anos e deveria ter elevado a sua temperatura interior em 100 graus Kelvin.

Muitas das descobertas científicas sobre Mercúrio foram conseguidas com a sonda espacial Mariner 10 que foi lançada em 3 de Novembro de 1973. Ela passou em 29 de Março de 1974 a uma distância de 705 quilómetros da superfície do planeta. Em 21 de Setembro de 1974 passou Mercúrio pela segunda vez e em 16 de Março de 1975 pela terceira vez. Durante estas visitas

foram obtidas mais de 2700 fotografias, cobrindo 45% da superfície de Mercúrio. Até esta altura os cientistas não suspeitavam que Mercúrio tinha um campo magnético.

Já antes da Mariner 10 se sabia que Mercúrio tinha uma alta densidade. A sua densidade é de 5.44 g/cm^3 e é comparável à densidade da Terra, de 5.52g/cm^3. Num estado não comprimido a densidade de Mercúrio é 5.5 g/cm^3 enquanto a da Terra é apenas 4.0 g/cm^3. Esta alta densidade indica que o planeta é constituído por 60% a 70% em peso de metal e 30 por cento em peso de silicatos. Isto dá um núcleo com um raio de 75% do raio do planeta e um volume do núcleo de 42% do volume do planeta.

2.4.2.1 Superfície de Mercúrio

As fotografias obtidas pela Mariner 10 mostram um mundo que parece a lua. Está crivado de crateras, contém bacias de anéis e muitas correntes de lava. As crateras variam em tamanho desde os 100 metros (a resolução de imagem mais pequena que se consegue obter com Mariner 10) até 1300 quilómetros, e estão em vários estados de conservação. Algumas são recentes, com arestas vivas e raios brilhantes. Outras estão altamente degradadas, com arestas que foram suavizadas pelo bombardeamento de meteoritos. A maior cratera em Mercúrio é a bacia Caloris Planitia. Uma bacia foi definida por Hartmann e Kuiper (1962) como uma "depressão circular larga com anéis concêntricos, distintos e linhas radiais." Outros consideram cada cratera com mais de 200 quilómetros como uma bacia. A bacia Caloris tem 1300 quilómetros de diâmetro, e pensa-se que foi causada por um projéctil com uma dimensão de mais de 100 quilómetros. O impacto produziu uma elevação com anéis concêntricos com três quilómetros de altura, e expeliu matéria pelo planeta até uma distância de 600 a 800 quilómetros. As ondas sísmicas produzidas pelo impacto em Caloris concentraram-se no outro lado do planeta e provocaram uma zona de terreno caótico. Após o impacto, a cratera foi parcialmente cheia com lava.

Mercúrio está cheio de grandes penhascos ou escarpas que aparentemente se formaram quando o planeta arrefeceu e sofreu uma compressão de alguns quilómetros. Esta compressão produziu uma crusta enrugada com escarpas de quilómetros de altura e centenas de quilómetros de comprimento.

A maior parte da superfície de Mercúrio está coberta de planícies. Muitas delas são antigas e crivadas de crateras, mas algumas das planícies têm menos crateras. Os cientistas classificaram estas planícies como planícies intercrateras e planícies suaves. As planícies intercrateras estão menos saturadas de crateras e têm menos de 15 quilómetros de diâmetro. Estas planícies foram formadas provavelmente quando as correntes de lava cobriram os terrenos mais antigos. As planícies suaves são recentes com poucas crateras. Existem planícies suaves à volta da bacia Caloris. Em algumas áreas podem ser vistas pequenas porções de lava a preencher as crateras.

A história da formação de Mercúrio é semelhante à da Terra. Há cerca de 4.5 biliões de anos formaram-se os planetas. Esta foi uma época de bombardeamento intenso sobre os planetas, que eram atingidos pela matéria e fragmentos da nebulosa de que foram formados. Logo no início desta formação, Mercúrio provavelmente ficou com um núcleo metálico denso e uma crusta de silicatos. Depois do intenso período de bombardeamento, correntes de lava percorreram o planeta e cobriram a crusta mais antiga. Por esta altura já muitos dos fragmentos tinham desaparecido e Mercúrio entrou num período de bombardeamento mais ligeiro. Durante este período foram formadas as planícies intercrateras. Então Mercúrio arrefeceu. O núcleo contraiu-se o que por sua vez quebrou a crusta e produziu as escarpas. Durante o terceiro estágio, a lava correu pelas regiões mais baixas, produzindo as áreas mais planas. Durante o quarto estágio, bombardeamentos de micrometeoritos criaram uma superfície de poeira que é conhecida por regolito. Alguns meteoritos pouco maiores atingiram a superfície e produziram as crateras de raios luminosos. Além de colisões ocasionais de meteoritos, a superfície de Mercúrio já não é activa e permanece no mesmo estado há milhões de anos.

2.4.2.2 Pode existir água em Mercúrio?

Podíamos supor que em Mercúrio não pode existir água em nenhuma forma. Tem pouquíssima atmosfera e é extremamente quente durante o dia, mas em 1991 cientistas em Caltech captaram ondas de rádio vindas de Mercúrio e descobriram algumas invulgarmente brilhantes vindas do polo norte. O brilho aparente do polo norte poderia ser explicado por gelo na superfície ou imediatamente abaixo da mesma. Mas será possível haver gelo em Mercúrio?

Devido à rotação de Mercúrio ser quase perpendicular ao plano orbital, o polo norte vê sempre o sol um pouco acima do horizonte. Porém o interior das crateras nunca está exposto ao Sol e os cientistas suspeitam que está a uma temperatura inferior a -161 ºC. A esta temperatura congelante as crateras podem ter água oriunda da evaporação do interior do planeta, ou gelo, trazido para o planeta pelo impacto de cometas. Estes hipotéticos depósitos de gelo podem ter sido cobertos com uma camada de pó e por isso mostrarem ainda os reflexos brilhantes no radar.

2.4.2.3 Estatísticas de Mercúrio

Massa (kg)	$3{,}303 \times 10^{23}$
Massa (Terra = 1)	$5{,}5271 \times 10^{-02}$
Raio equatorial (km)	2 439,7
Raio equatorial (Terra = 1)	$3{,}8252 \times 10^{-01}$
Densidade média (gm/cm^3)	5,42
Distância média ao Sol (km)	57 910 000
Distância média ao Sol (Terra = 1)	0,3871
Período de rotação (dias)	58,6462
Período orbital (dias)	87,969
Velocidade orbital média (km/seg.)	47,88
Excentricidade orbital	0,2056
Inclinação do eixo (graus)	0,00
Inclinação orbital (graus)	7,004
Gravidade à superfície no equador(m/seg^2)	2,78
Velocidade de escape no equador (km/seg.)	4,25
Albedo geométrico visual	0,10
Magnitude (Vo)	-1,9
Temperatura média à superfície	179°C
Temperatura máxima à superfície	427°C
Temperatura mínima à superfície	-173°C
Composição atmosférica	
Hélio	42%
Sódio	42%
Oxigénio	15%
Outros	1%

.Tabela 2.3 – Estatísticas de Mercúrio

2.4.3 Vénus



O avanço na ciência consegue-se sobrepondo tijolo após tijolo, e não erigindo subitamente palácios fantásticos.- J. S. Huxley

Vénus, a jóia do céu, era conhecida pelos primeiros astrónomos como estrela da manhã e estrela da tarde. Esses astrónomos pensavam que Vénus era composta por dois corpos distintos, pois tal como a Lua apresenta fases. Vénus, a deusa romana do amor e da beleza, está coberta por uma espessa camada de nuvens em turbilhão.

Os astrónomos referem-se a Vénus como o planeta irmão da Terra. São ambos semelhantes em dimensão, massa, densidade e volume. Foram ambos formados mais ou menos ao mesmo tempo e condensados a partir da mesma nebulosa. Contudo, nos últimos anos os cientistas descobriram que as semelhanças terminam aqui. Vénus é muito diferente da Terra. Não tem oceanos e está envolto numa atmosfera pesada composta principalmente por dióxido de carbono e quase sem vapor de água. As suas nuvens são compostas por gotas de ácido sulfúrico. Na superfície, a pressão atmosférica é 92 vezes a da Terra ao nível do mar.

Vénus é queimado por uma temperatura à superfície de aproximadamente 482°C. Esta temperatura elevada deve-se principalmente a um rápido efeito estufa originado pela pesada atmosfera de dióxido de carbono. A luz do Sol passa pela atmosfera e aquece a superfície do planeta. O calor é irradiado mas fica aprisionado pela densa atmosfera que não permite a sua fuga para o espaço. Isto torna Vénus mais quente do que Mercúrio.

Um dia Venusiano tem 243 dias terrestres e é mais longo que o seu ano de 225 dias. Curiosamente, Vénus gira de leste para oeste. Para um observador em Vénus, o Sol nasceria a oeste e teria o seu ocaso a leste. Até há pouco tempo, a densa cobertura de nuvens de Vénus impediu a observação aos cientistas da natureza geológica da sua superfície. O aperfeiçoamento dos rádio - telescópios e sistemas de radares de imagem orbitando o planeta tornaram possível ver a superfície através do patamar de nuvens. Quatro das mais bem sucedidas missões a revelarem a superfície Venusiana são a Missão Pioneer Vénus da NASA (1978), as missões Soviéticas Venera 15 e 16 (1983-1984), e a missão Magalhães de mapeamento por radar da NASA (1990-1994). À medida que

estas sondas começaram a mapear o planeta, uma outra imagem de Vénus se revelou. A superfície de Vénus é relativamente nova, geologicamente falando. Parece ter sido refeita completamente há 300 a 500 milhões de anos atrás. Os cientistas debatem o como e porquê deste acontecimento. A topografia Venusiana é composta de vastas planícies cobertas de correntes de lava e montanhas ou regiões montanhosas deformadas por actividade geológica. O Maxwell Montes em Ishtar Terra é o pico mais alto de Vénus. A região montanhosa de Aphrodite Terra estende-se por quase metade de todo o equador. As imagens da missão Magalhães das regiões montanhosas acima de 2,5 quilómetros são habitualmente brilhantes, característica de um solo húmido. Contudo, água em estado líquido não existe à superfície e não é a responsável pelo brilho característico das regiões montanhosas. Uma teoria sugere que a matéria brilhante possa ser uma formação de compostos metálicos. Estudos feitos revelaram que o material poderá ser pirite (também conhecida por ouro dos trouxas). Este efeito poderá também ser resultante de algum tipo de material exótico que daria os mesmos resultados mas em concentrações mais baixas. Vénus está marcado por numerosas crateras de impacto distribuídas aleatoriamente pela superfície. Pequenas crateras com menos de 2 quilómetros, são praticamente inexistentes graças à pesada atmosfera Venusianas. As excepções ocorrem quando grandes meteoritos se fraccionam pouco antes do impacto, criando aglomerados de crateras. Vulcões e formações vulcânicas são ainda mais numerosas. Pelo menos 85% da superfície de Vénus está coberta de rocha vulcânica. Gigantescas correntes de lava, que se estendem por centenas de quilómetros, inundaram as zonas de baixo relevo criando vastas planícies. Mais de 100 000 pequenos vulcões preenchem a superfície juntamente com centenas de grandes vulcões. As correntes dos vulcões abriram longos e sinuosos canais que se prolongam por centenas de quilómetros, tendo um deles aproximadamente 7 000 quilómetros. Foram encontradas, em Vénus, gigantescas caldeiras, com mais de 100 quilómetros de diâmetro. Algumas formações de Vénus são únicas, como as coronae e as aracnóides. Coronae são grandes formações ovais, rodeadas de penhascos com centenas de quilómetros de diâmetro. Pensa-se que são elevações do manto expressos na superfície. Aracnóides são formações circulares ou alongadas semelhantes às coronae.

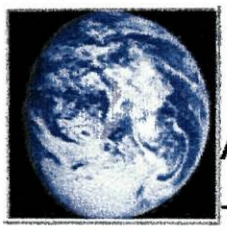
Ambas poderão ter aparecido como resultado de rochas fundidas deslizando pelas fracturas da superfície, produzindo sistemas de diques e fracturas radiais.

2.4.3.1 Estatísticas de Vénus

Estatísticas de Vénus	
Massa (kg)	4,869x10 $^{+24}$
Massa (Terra = 1)	0,81476
Raio equatorial (km)	6 051,8
Raio equatorial (Terra = 1)	0,94886
Densidade média (gm/cm^3)	5,25
Distância média do Sol (km)	108 200 000
Distância média do Sol (Terra = 1)	0,7233
Período de rotação (dias)	-243, 0187
Período orbital (dias)	224,701
Velocidade orbital média(km/s)	35,02
Excentricidade orbital	0,0068
Inclinação do eixo (graus)	177,36
Inclinação orbital (graus)	3,394
Gravidade equatorial na superfície (m/seg^2)	8,87
Velocidade de escape no equador(km/seg)	10,36
Albedo geométrico visual	0,65
Magnitude (Vo)	-4,4
Temperatura média na superfície	482°C
Pressão Atmosférica (bars)	92
Composição atmosférica Dióxido de Carbono Nitrogénio Vestígios de : Dióxido de enxofre, vapor de água, monóxido de carbono, árgon, hélio, neón, cloreto de hidrogénio e fluoreto de hidrogénio.	 96% 3+%

Tabela 2.4 – Estatísticas de Vénus

2.4.4 Terra



A minha visão do nosso planeta era um relance de divindade.
-Edgar Mitchell, EUA

A Terra, o nosso planeta parece ser grande e robusto, com um oceano interminável de ar. Do espaço, os astronautas muitas vezes têm a impressão de que a Terra é pequena, e tem uma fina e frágil camada de atmosfera. Para um viajante do espaço, as características que distinguem a Terra são as águas azuis, as massas de terra verdes e castanhas, e o conjunto de nuvens brancas contra um fundo negro. Muitos sonham em viajar pelo espaço e ver as maravilhas do universo. Na realidade, todos nós somos viajantes espaciais. A nossa nave é o planeta Terra, viajando a uma velocidade de 108 000 quilómetros por hora. Apenas na época de Copérnico (século XVI) é que se compreendeu que a Terra era apenas "outro planeta".

A Terra é o terceiro planeta a contar do Sol, a uma distância do mesmo de 150 milhões de quilómetros. Demora 365,256 dias para girar em volta do Sol e 23,9345 horas para efectuar uma rotação completa. Tem um diâmetro de 12 756 quilómetros, apenas poucas centenas de quilómetros maior que o de Vénus. A nossa atmosfera é composta por 78% de azoto, 21% de oxigénio e 1% de outros componentes.

A Terra é o único planeta conhecido a possuir vida no Sistema Solar. O núcleo do planeta, de níquel- ferro fundido rodando rapidamente, provoca um extenso campo magnético que, junto com a atmosfera, nos protege de praticamente toda a radiação prejudicial vinda do Sol e outras estrelas. A atmosfera da Terra protege-nos ainda dos meteoros, cuja maioria se desintegra antes de poder atingir a superfície.

Além de afectar a meteorologia da Terra, a actividade solar causa um dramático fenómeno visual na nossa atmosfera. Quando as partículas carregadas do vento solar são capturadas pelo campo magnético da Terra, colidem com as moléculas de ar da nossa atmosfera acima dos pólos magnéticos do planeta. Estas moléculas de ar tornam-se então incandescentes dando origem a fenómenos conhecidos como auroras ou luzes do norte e do sul.

O núcleo terrestre é composto quase inteiramente de ferro (ou níquel/ferro), e as temperaturas aí podem chegar aos 7300ºC.

A Terra tem a forma de um elipsóide de revolução com achatamento de 1/300 do raio equatorial. Esta forma é uma aproximação, pois na realidade a forma é bem mais complexa, devido à acção de várias forças: a gravidade e a força centrípeta, (devido a rotação) é que dão a forma de elipsóide e as outras forças que são bem menores provocam um desvio mínimo dessa forma.

2.4.4.1 Estatísticas da Terra

Estatísticas sobre a Terra	
Massa (kg)	5, 976x10+24
Massa (Terra = 1)	1.0000 x10+00
Raio equatorial (km)	6.378,14
Raio equatorial (Terra = 1)	1,0000 x10+00
Densidade média (g/cm^3)	5,515
Distância média do Sol (km)	149 600 000
Distância média do Sol (Terra = 1)	1,0000
Período de rotação (dias)	0,99727
Período de rotação (horas)	23,9345
Período Orbital (dias)	365,256
Velocidade orbital média (km/s)	29,79
Excentricidade orbital	0,0167
Inclinação do Eixo (graus)	23,45
Inclinação orbital (graus)	0,000
Velocidade de escape no equador (km/s)	11,18
Gravidade à superficie no equador (m/s^2)	9,78
Albedo visual geométrico	0,37
Temperatura média à superfície	15°C
Pressão atmosférica (bar)	1,013
Composição atmosférica	
Azoto	77%
Oxigénio	21%
Outros	2%

Tabela 2.5 – Estatísticas da Terra

Tomada como um todo, a composição química da Terra (em massa) é:

34.5%	Ferro
29.5%	Oxigénio
15.2%	Silício
12.7%	Magnésio
2.4%	Níquel
1.9%	Enxofre
0.05%	Titânio

2.4.4.3 Idade da Terra

Os cálculos para determinação da Idade da Terra são feitos através de rochas radioactivas, encontradas na crosta. Na posse de uma amostra de rocha contendo traços de elementos radioactivos que se solidificou em certa época, basta conhecer as semi - vidas (período de desintegração) desses elementos para saber o intervalo de tempo decorrido desde a sua formação. A amostra não pode ter sido contaminada com amostras estranhas de elementos radioactivos.
As mais antigas encontradas até hoje datam de à 3,8 bilhões de anos e foram encontradas na Groenlândia. Isso implica que a Terra se formou antes disso, pois nessa época a Terra já se havia solidificado. De análises de meteoritos, foi concluído que estes datam de 4,5 a 4,6 bilhões de anos. Acredita-se que esta foi a época em que se formaram os primeiros corpos sólidos do sistema solar

2.4.4.4. Estrutura Geológica

Ainda não se conseguiram informações directas sobre o que há no interior terrestre, pois a perfuração mais profunda, conseguida na década de 80 na então URSS, não chega a 13 km. É uma distância ínfima, em relação ao raio terrestre, que nem sequer atravessa a crosta. Os estudos sobre o interior terrestre são feitos de forma indirecta, pesquisando-se principalmente os abalos sísmicos (terremotos) e pelas rochas trazidas pelas erupções vulcânicas. Os abalos sísmicos são cerca de 300.000 por ano, mas apenas cerca de 100 são

perceptíveis em todo o mundo. Pelo estudo da propagação das ondas sísmicas concluiu-se quase todo o estudo estrutura geológica que existe hoje.

Crosta: Pode ser crosta continental ou oceânica. A crosta oceânica com espessura média de cinco quilómetros, é composta principalmente de rochas basálticas ricas em silício, alumínio, ferro e magnésio. A continental, com uma espessura que varia de 20 a 65 km, rica em granito e pobre em silício na parte superior, é separada pela descontinuidade de Conrad da parte inferior, que contém rochas ricas em silício.

Mantos: Tanto a crosta continental como a oceânica são separadas do manto pela descontinuidade de Mohorovic. O manto ocupa 80% do volume terrestre e é dividido em manto superior (com 1000 km de espessura) e o inferior (com 1900 km de espessura), totalizando 2900 km de espessura total.
Núcleo Externo: Com 2100 km de espessura é formado por uma liga líquida de ferro e níquel.
Núcleo Interno: com raio de 1370 km, é de composição idêntica ao núcleo externo, porém em estado sólido. A sua existência não é totalmente comprovada, mas é uma teoria bem aceita na comunidade científica, principalmente por aqueles que estudam as origens do campo magnético da Terra e que se baseiam na existência de um núcleo metálico dessa forma, para explicarem as suas teorias. Supostamente existe uma camada de transição entre os núcleo externos e internos que não chega a 100 km.

A densidade na crosta é de 2,8 g/cm^3 em média, chega a 3,3 no manto superior e aumenta com a profundidade até 5,7 g/cm^3 antes da transição manto- núcleo, onde passa bruscamente a 9,7 g/cm^3 , até chegar a 15 g/cm^3 o centro da Terra. A pressão lá é de 3,6 milhões de atmosferas e a temperatura é estimada em 3500 K, no mínimo.

2.4.4.5. Atmosfera

A atmosfera da Terra é 77% azoto, 21% oxigénio, com traços de árgon, dióxido de carbono e água.

Na troposfera, isto é nos dez primeiros quilómetros da camada atmosférica a partir da superfície terrestre que abriga 75% da massa total da atmosfera ocorrem os principais fenómenos meteorológicos. A temperatura nesta camada diminui com a altitude em cerca de 6,5°C por quilómetro

A tropopausa é a zona limite de transição entre a troposfera e a estratosfera, que é a segunda camada atmosférica. Nessa camada há uma queda de temperatura com a altitude, mas esse quadro inverte-se, ou seja, a temperatura estabiliza-se e depois passa a aumentar chegando a assumir valores de superfície, com máximos de 0°C. Isso deve-se à ausência de vapor de água e ás reacções químicas que transformam ozono em oxigénio diatómico, provocadas pela incidência de radiação ultravioleta.

Após a estratopausa, outra zona limite de transição, está a mesosfera, onde a temperatura volta cair bruscamente até -80°C a cerca de 80 km de altitude. A partir daí a atmosfera restante não tem influência nos fenómenos meteorológicos. A camada superior (ionosfera) é carregada electricamente devido à elevada incidência dos raios solares, e por isso reflecte as ondas de rádio. Nessa região onde as pressões são baixíssimas e o ar muito rarefeito, é difícil determinar o limite da atmosfera. Ainda assim distinguiu-se outra camada, a termosfera, e acima dessa a exosfera, na qual estão os satélites artificiais.

2.4.4.6. Origem da Atmosfera

A atmosfera da Terra, tal como as de Vénus e Marte têm origem secundária, ou seja, não se formaram da nebulosa primitiva que deu origem ao sistema solar. Em vez disso acredita-se que se tenham formado a partir dos gases que emanaram dos vulcões após os planetas já se terem formado. Essa atmosfera substituiu a primitiva, que provavelmente teve origem nos resquícios da nebulosa planetária e era constituída principalmente por hidrogénio, hélio e traços de metano, vapor de água, amoníaco, nitrogénio e gases nobres.

A atmosfera secundária que teve origem vulcânica, deve ter-se formado nos primeiros 500 milhões de anos após a formação da Terra, numa fase de intensa actividade vulcânica, e com a composição inicial sendo CO ou anidrido carbónico. Ainda hoje os vulcões emitem em suas erupções grandes quantidades de CO_2 e vapor de água.

2.4.5. Lua

Foi chamada de Luna pelos romanos, Selene e Ártemis pelos gregos. É conhecida desde os tempos pré-históricos. É o segundo astro mais brilhante no céu depois do Sol.

Rotação: 27,32 dias
Translação: 27,32 dias
Diâmetro (Km): 3474
Massa : $7{,}35 \times 10^{22}$ Kg
Temperatura máxima :123ºC
Temperatura mínima: -233ºC
Gravidade: $1{,}62 m/s^2$



A Lua é um satélite que tem ¼ do diâmetro da Terra, e está apenas a 384 400 Km de distância da mesma. A superfície da Lua é rica em alumínio e titânio e seu interior é rochoso. Há possibilidades de existir água na Lua (em pequena quantidade), mas não atmosfera. A falta de água líquida e de atmosfera que forme ventos, impede qualquer erosão, por isso a Lua tem as crateras visíveis.
Embora a quantidade de meteoritos que caem na Terra seja muito maior do que a quantidade que cai na Lua, na Terra a erosão causada pela chuva e vento desmancha as crateras produzidas.
A Lua é um dos maiores satélites quando comparada com o planeta em torno do qual orbita, com uma relação 1/81 da massa terrestre. Por isso o sistema Terra - Lua pode ser considerado um sistema planetário duplo. O acoplamento gravitacional entre a Lua e a Terra, além de causar as marés, também transfere energia gravitacional da Terra para a Lua. Isso diminui a rotação da Terra (em cerca de 1,48 milisegundos/século) e acelera a Lua para uma órbita maior. Está a afastar-se gradualmente da Terra a uma taxa de cerca de 3,5 cm por ano. Por ser o objecto celeste mais próximo da Terra, foi possível, através de missões tripuladas, trazer para a Terra amostras da sua superfície. Da análise dessas amostras, verificou-se que a sua composição é muito semelhante à da Terra, contendo praticamente os mesmos minerais. Porém não foi encontrado nenhum vestígio de água nem erosão atmosférica. Concluiu-se que a Lua, no início da sua formação era recoberta por uma espessa camada de lava fundida, que arrefeceu gradualmente formando uma crosta uniforme de rochas claras.

Essa crosta recém formada foi submetida a um intenso bombardeamento de meteoritos que originou as crateras conhecidas. O choque de meteoritos com maiores dimensões foi a causa das grandes depressões. A energia gerada e a contracção provocada pelos impactos fizeram com que o interior lunar, ainda quente, se voltasse a aquecer fundindo de novo o magma. Esse magma fundido (de origem basáltica) aflorou à superfície nos locais enfraquecidos pelo impacto. O magma espalhou-se e formou as regiões baixas, vistas da Terra como manchas escuras, que se designam por mares lunares. Isso aconteceu até cerca de dois biliões de anos após a sua formação.

Devido à baixa gravidade lunar, (que permite maior espalhamento das partículas) os últimos impactos de grande porte fizeram com que toda a poeira se misturasse tornando possível colher, num único local, amostras de diversas regiões da Lua. Como aconteceu com todos os planetas terrestres na sua formação, quando ainda estavam na fase líquida os materiais mais densos da Lua deslocaram-se para o centro, e ficando os menos densos concentrados na crosta. Porém esta distribuição foi-se modificado posteriormente pelo bombardeio de meteoros. As análises feitas revelam que os continentes (regiões claras) são formadas por um tipo de rocha à base de óxido de cálcio, alumínio e silício. Já os mares (regiões escuras) apresentam grande quantidade de ferro e titânio, que se afloraram das regiões bem escuras mais profundas.

2.4.5.1. Crateras lunares

As crateras lunares são bem diversificadas quanto ao seu tamanho, variando desde algumas centenas de quilómetros até alguns micrómetros. Estas últimas existem porque não há erosão na superfície lunar, e são encontradas, tanto nas rochas, como na própria superfície recoberta de poeira.

As crateras podem ser classificadas como:

Primárias - dispostas geralmente de modo aleatório, havendo alguns alinhamentos determinados pela queda simultânea de um grupo de meteoros.

Secundárias - Localizadas em torno das primárias. São menores e pouco profundas. Geralmente caracterizadas pelas raias, formadas pela expulsão de matéria no momento do impacto, em resultado da qual se formaram sulcos no solo em forma de raios.

Vulcânicas - em número muito menor do que as de impacto. O material que forma estas crateras e a região ao seu redor são partículas sólidas e finas.

2.4.5.2. Estrutura

Baseado nas análises feitas, elaborou-se uma teoria sobre a sua estrutura. Esta é formada pela crosta, composta de basaltos; mais abaixo o manto médio, formado pelo mesmo material da crosta, mas com alterações devido ao aquecimento provocado pelos grandes impactos que deram origem aos mares; o manto inferior, composto de material no estado plástico; e finalmente o núcleo, constituído basicamente de ferro, pouco níquel e talvez enxofre.

2.4.5.3 Origem da Lua

Antes do estudo das amostras trazidas pela Apolo, não havia consenso sobre a origem da Lua, havia três teorias principais:
- a hipótese da co-acreção, segundo a qual a Lua e a Terra se teriam formado ao mesmo tempo a partir da nebulosa solar; mas existem diferentes quantidades de ferro na Terra e na Lua.
- a hipótese da fissão, que defendia a hipótese de que a Lua se teria originado por fissão da própria Terra; mas existe diferença na composição química entre a Terra e a Lua.
- a hipótese da captura, que postulava a formação da Lua num outro ponto do universo, sendo subsequentemente capturada pela Terra. Mas a órbita da Lua tem raio e excentricidade que são muito diferentes da Terra.

As informações trazidas pelas pedras lunares da Apolo, levaram à Hipótese do impacto, onde a colisão da Terra com um objecto de grande dimensão levaria à formação da Lua a partir do material ejectado. A teoria do impacto é a presentemente aceite.

2.4.6 Marte



Onde não existir visão, as pessoas deixarão de existir - .Provérbio

Marte é o quarto planeta partindo do Sol e é normalmente referido como o Planeta Vermelho. As rochas, solo e céu têm uma tonalidade vermelha ou rosa. A cor vermelha característica foi observada por astrónomos ao longo da história. Os romanos atribuíram-lhe este nome, em honra ao deus da guerra. Outras civilizações deram-lhe nomes semelhantes. Os antigos egípcios chamaram-lhe *Her Descher* que significa *o vermelho*. Sem dúvida nenhuma é o planeta que mais deu origem a superstições e contos de fadas. É observado desde os primórdios da astronomia moderna. Foi o planeta mais estudado na antiguidade, e isso possibilitou a Johannes Keppler (1571-1630), através das observações de Tycho Brahe (1546-1601) descobrir as leis que regem os movimentos planetários.

Galileu Galilei (1564-1642), quando observou Marte em 1610 não soube afirmar se via as fases do planeta ou se o planeta não era perfeitamente redondo. Depois dele alguns outros puderam identificar algumas manchas na sua superfície e em 1666 Jean Dominique Cassini (1625-1712) concluiu que o período de rotação do planeta é 24h 40 min e observou a presença de calotas polares. Mais tarde observou-se a presença de uma camada atmosférica espessa o suficiente para abrigar vida. As manchas escuras observadas sugeriram a presença de oceanos e vegetação. Porém é a partir de 1870 que começa a grande polémica sobre a existência de vida no planeta vermelho.

Dispondo de um bom telescópio refractor para a época, Giovanni Schiaparelli (1835-1910) faz uma nova cartografia de Marte, a qual gerou muitas polémicas e especulações sobre a existência de vida em Marte. Nos seus mapas Schiaparelli destaca a presença de diversas estruturas lineares que denominou de canais. Essa denominação provocou muita divergência entre os pesquisadores da época. Uns afirmavam ser estruturas naturais e outros afirmavam ser estruturas artificiais, construídas pelos habitantes marcianos. A segunda hipótese prevaleceu por algum tempo, principalmente nos países de língua inglesa, provocado por um erro de tradução da palavra canali (usada por Shiaparelli) por canals que significa canais artificiais. Edward Pickering (1846-1919) observou

que no cruzamento de dois ou mais canais haviam estruturas circulares bem extensas e que foram interpretadas como oásis nos desertos marcianos. Os canais seriam redes hidráulicas em todo o planeta que sustentava a pouca agricultura para a sobrevivência dos marcianos que podiam ser uma civilização decadente.

No final do século XIX George Hale (1868-1938), Edward Barnard (1857-1923) e Asaph Hall (1929-1907) que descobriu os pequenos satélites do planeta (Phobos e Deimos), afirmaram que as ligações lineares entre as manchas, no planeta, eram apenas ilusão óptica. Esta explicação provou-se com o tempo, colocando-se no lugar a hipótese de que os canais sejam na verdade estrias irregulares, manchas e zonas de reflexão pouco uniforme.

As conclusões a respeito deste planeta tomaram novos rumos com o envio da sonda Mariner 4 (em 1965), que forneceu dados muito mais precisos sobre a sua atmosfera e superfície. Esta foi a primeira missão de sucesso ao planeta vermelho. O processo de exploração espacial seguiu até 2000 com a Mars Global Surveyor.

Em Julho de 1965, a Mariner 4 transmitiu 22 fotografias de perto de Marte. Foi revelada unicamente uma superfície contendo muitas crateras e canais naturais mas nenhuma evidência de canais artificiais ou água corrente. Finalmente, em Julho e Setembro de 1976, as sondas Viking 1 e 2 pousaram na superfície de Marte. As três experiências biológicas realizadas a bordo das sondas descobriram actividade química inesperada e enigmática no solo marciano, mas não forneceram qualquer evidência clara da presença de microorganismos vivos no solo perto dos locais onde aterraram. De acordo com os biologistas da missão, Marte é auto- esterilizante. Eles acreditam que a combinação da radiação solar ultravioleta que satura a superfície, a extrema secura do solo e a natureza oxidante da química do solo impedem a formação de organismos vivos no solo marciano. A questão de ter existido vida em Marte num passado distante permanece contudo aberta.

Em 1971 a sonda Mariner 9 foi colocada em órbita do planeta, com a função de fazer mapas detalhados da sua superfície, que foi toda mapeada através de fotos, e estas mostravam detalhes até um quilómetro, tendo 1% dessa superfície sido fotografada com detalhes de 100 metros.

No local onde Shiaparelli pensou ser iluminado artificialmente, por ser o ponto de maior brilho encontrado nas suas observações foi detectado a presença de um vulcão com 24 km de altura e uma cratera com 500 Km de diâmetro (Monte Olimpo). Foi visto como o ponto mais iluminado porque a sua cratera tem um poder de reflexão maior do que as regiões vizinhas. Pouco mais longe outros três vulcões com mais de 20 km de altitude foram encontrados, nas proximidades desses vulcões foi observado um canyon com mais de 5.000 km de extensão, profundidade de cerca de dois quilómetros e alguns pontos onde a sua largura ultrapassa os 400 km (Vale Marianers). Além disso existe um número elevado de crateras de impacto. Existem vales que parecem leitos de rios secos, podem ter sido os canais observados por Shiaparelli.

Depois do final da grande polémica onde muita coisa caiu em descrédito, voltou-se a acreditar que exista água no planeta e em quantidades muito maiores do que as previstas.

Acreditando na possibilidade de vida em Marte (na forma microscópica) é que em 1975 foram lançadas as Sondas Viking 1 e 2, cada uma formada por um satélite, que deveria orbitar em torno do planeta e uma segunda parte que deveria pousar na superfície marciana, com o objectivo de fazer algumas experiências no solo e na atmosfera, além do reconhecimento visual. As experiências em solo não forneceram nenhum resultado conclusivo sobre a existência de vida bacteriana em Marte.

A sua superfície é composta principalmente de óxidos de ferro, que lhe dão a cor característica (Ocre-Alaranjado).

Calotas Polares: Mostram variações muito nítidas e periódicas. No inverno de um hemisfério a camada de gelo torna-se bastante extensa podendo atingir o meio do caminho entre o polo e o equador. Com o auxilio dos radiômetros infravermelhos das sondas Mariner concluiu-se que a temperatura da superfície da calota é de (-132°C) ou seja, a temperatura de condensação do CO_2, isto quer dizer que os pólos são recobertos por CO_2 sólido, ou seja, neve carbónica.

Outros instrumentos não encontraram sinais de química orgânica nos seus locais de poiso, mas forneceram uma análise definitiva e precisa da composição da atmosfera marciana e encontraram traços de elementos que não tinham sido previamente detectados.

2.4.6.1. Atmosfera e clima

A atmosfera de Marte é bastante diferente da atmosfera da Terra. É composta principalmente por dióxido de carbono com pequenas porções de outros gases. Os seis componentes mais comuns da atmosfera são:

Dióxido de Carbono (CO2): 95.32%

Azoto (N2): 2.7%

Árgon (Ar): 1.6%

Oxigénio (O2): 0.13%

Água (H2O): 0.03%

Néon (Ne): 0.00025 %

O ar marciano contém apenas 1/1000 da água do nosso ar, mas mesmo esta pequena porção pode condensar, formando nuvens que flutuam a uma grande altitude na atmosfera ou giram em volta dos vulcões mais altos. Podem-se formar bancos de neblina matinal nos vales. No local de aterragem da sonda Viking 2, uma fina camada de gelo cobre o solo em cada inverno.

Há evidências de que no passado uma atmosfera marciana mais densa pode ter permitido que a água corresse no planeta. Características físicas muito parecidas com costas, gargantas, leitos de rios e ilhas sugerem que alguma vez existiram grandes rios no planeta. Apesar da baixa densidade e pouca pressão atmosférica (equivalente à pressão atmosférica da Terra a 30 Km de altitude), registaram-se em Marte vendavais que cobriam todo a superfície do planeta de poeira, com ventos de até 240 km/h.

É o único planeta além da Terra do qual podemos falar sobre clima. Os pesquisadores que se dedicaram à constante observação de Marte puderam distinguir estações climáticas semelhantes às terrestres. Porém devemos considerar que o ano marciano é quase o dobro do ano terrestre e os dias de Marte são de 24h 36min portanto as estações lá tem em média o dobro dos dias das estações terrestres.

Podemos comparar o clima equatorial de Marte com o de uma montanha muito alta em dia claro e seco. O calor durante o dia é pouco amenizado pelas nuvens e neblina. E à noite é rápida a irradiação do calor absorvido durante o dia, para o espaço fazendo muito frio. A amplitude térmica do dia para a noite e de uma estação para outra são muito grandes.

2.5.6.2. Temperatura e Pressão

A temperatura média registada em Marte é -63° C com uma temperatura máxima de 20° C e mínima de -140° C.

A pressão atmosférica varia semestralmente em cada local de aterragem. O dióxido de carbono, o maior constituinte da atmosfera, congela de modo a formar uma imensa calote polar, alternadamente em cada pólo. O dióxido de carbono forma uma grande cobertura de neve e evapora-se novamente com a chegada da primavera em cada hemisfério. Quando a calote do polo sul é maior, a pressão diária média observada pela sonda Viking 1 tem o valor baixo de 6.8 milibars; noutras épocas do ano chega a atingir o valor de 9.0 milibars. As pressões do local da sonda Viking 2 eram 7.3 e 10.8 milibars. Em comparação, a pressão média na Terra é 1000 milibars.

2.4.6.3. Satélites de Marte

Fobos: O mais próximo do planeta, tem diâmetro equatorial bem maior que o diâmetro polar. Seu período de translação ao redor do planeta é de 7h 40min, sendo o único satélite do sistema solar com período de translação menor do que a rotação do seu planeta. Isso se deve à grande proximidade do centro do planeta 9.400 Km. A sua órbita está abaixo da altitude sincrona, as forças de maré estão a atraí-lo em direcção a Marte. Em menos de 100 milhões de anos, vai-se fragmentar, transformando-se num anel, ou colidirá com o planeta Marte.

Deimos: O mais afastado (23.500 Km do centro), tem período de translação de 30h 17min. As suas dimensões são cerca de metade de Fobos. Ambos os satélites possuem uma forma bem irregular assemelhando-se a uma batata com dimensões em torno de 15 quilómetros. São compostos de rochas ricas em carbono e gelo, como os asteróides e são muito "craterizados". Provavelmente são asteróides perturbados por Júpiter para órbitas que lhes permitiram ser capturados por Marte.

Lua	#	Raio (km)	Massa (kg)	Distância (km)	Descobridor	Data
Fobos	I	13.5x10.8x9.4	$1.08 \times 10^{+16}$	9 380	A. Hall	1877
Deimos	II	7.5x6.1x5.5	$1.80 \times 10^{+15}$	23 460	A. Hall	1877

Tabela 2.6 – Resumo das luas de Marte

2.4.6.4 Estatísticas de Marte

Massa (kg)	$6.421 \times 10^{+23}$
Massa (Terra = 1)	1.0745×10^{-01}
Raio equatorial (km)	3,397.2
Raio equatorial (Terra = 1)	5.3264×10^{-01}
Densidade média (gm/cm^3)	3.94
Distância média ao Sol (km)	227 940 000
Distância média ao Sol (Terra = 1)	1.5237
Período de rotação (horas)	24.6229
Período de rotação (dias)	1.025957
Período orbital (dias)	686.98
Velocidade média orbital (km/seg)	24.13
Excentricidade orbital	0.0934
Inclinação do eixo (graus)	25.19
Inclinação orbital (graus)	1.850
Gravidade à superfície no equador (m/seg^2)	3.72
Velocidade de escape no equador (km/seg)	5.02
Albedo geométrico visual	0.15
Magnitude (Vo)	-2.01
Temperatura mínima à superfície	-140°C
Temperatura média à superfície	-63°C
Temperatura máxima à superfície	20°C
Pressão atmosférica (bars)	0.007
Composição atmosférica	
Dióxido de Carbono (C02)	95.32%
Azoto (N2)	2.7%
Árgon (Ar)	1.6%
Oxigénio (O2)	0.13%
Monóxido de Carbono (CO)	0.07%
Água (H2O)	0.03%
Néon (Ne)	0.00025%
Kripton (Kr)	0.00003%
Xénon (Xe)	0.000008%
Ozono (O3)	0.000003%

Tabela 2.7 – Estatísticas de Marte

2.4.7. Júpiter



Então eu senti-me como um observador dos céus quando um novo planeta entra no alcance da sua vista. - John Keats

Júpiter é o quinto planeta mais próximo do Sol e é o maior do sistema solar. Se Júpiter fosse oco, caberiam mais de mil Terras no seu interior. Contém também mais matéria do que todos os outros planetas juntos (aproximadamente o dobro). Tem uma massa de 1.9×10^{27} kg e um diâmetro de 142 984 quilómetros no equador. Júpiter tem 16 satélites, quatro dos quais - Calisto, Europa, Ganímedes e Io - foram observados por Galileu já em 1610. Tem um sistema de anéis, que é muito ténue e totalmente invisível visto da Terra. (Os anéis foram descobertos em 1979 pela Voyager 1.) A atmosfera é muito profunda, talvez compreendendo todo o planeta, e tem algumas semelhanças com a do Sol. É composta principalmente por hidrogénio e hélio, com pequenas porções de metano, amónia, vapor de água e outros componentes. A grande profundidade dentro de Júpiter, a pressão é tão elevada que os átomos de hidrogénio estão quebrados e os electrões estão livres, de tal modo que os átomos resultantes consistem de simples protões. Isto produz um estado em que o hidrogénio se torna metálico.

Faixas coloridas latitudinais, nuvens atmosféricas e tempestades ilustram o dinâmico sistema meteorológico de Júpiter. O padrão das nuvens mudam de hora para hora, ou de dia para dia. A Grande Mancha Vermelha é uma tempestade complexa que se move numa direcção anti-horária. Na borda, a matéria parece rodar de quatro a seis dias; perto do centro, o movimento é menor e numa direcção quase aleatória. Podem-se descobrir cadeias de outras tempestades mais pequenas e redemoinhos pelas diversas faixas de nuvens.

Foram observadas emissões aurorais, semelhantes às auroras boreais da Terra, nas regiões polares de Júpiter. As emissões aurorais parecem estar relacionadas com matéria de Io que cai na atmosfera de Júpiter, movendo-se em espiral segundo as linhas do campo magnético. Também foram observados relâmpagos luminosos acima das nuvens, semelhantes aos super- relâmpagos na alta atmosfera da Terra.

2.4.7.1. O Anel de Júpiter

Ao contrário dos intrincados e complexos padrões de anéis de Saturno, Júpiter tem um sistema simples de anéis que é composto por um halo interior, um anel principal e um anel Gossamer. Para a sonda Voyager, o anel Gossamer é visto como um único anel, mas o sistema de imagens da Galileo deu-nos a descoberta inesperada de que Gossamer é na realidade formado por dois anéis. Um anel está inserido no outro. Os anéis são muito ténues e são compostos por partículas de poeira formada de meteoróides interplanetários esmagados nas quatro luas interiores de Júpiter, Métis, Adrástea, Tebe e Amalteia. Muitas das partículas são de dimensões microscópicas.

O halo do anel interior tem a forma de toróide e estende-se radialmente desde 92000 quilómetros até cerca de 122500 quilómetros do centro de Júpiter. É formado por partículas finas de poeira dos limites interiores do anel principal espalhada para fora enquanto caía em direcção ao planeta. O anel principal e mais brilhante estende-se desde os limites do halo até cerca de 128940 quilómetros ou seja, mesmo até ao limite interior da órbita de Adrástea. Perto da órbita de Métis, o brilho do anel principal diminui.

Os dois anéis fracos Gossamer são semelhantes na natureza. O anel interior Gossamer de Amalteia estende-se desde a órbita de Adrástea até à órbita de Amalteia a 181000 quilómetros do centro de Júpiter. O anel Gossamer de Tebe, mais fraco, estende-se desde a órbita de Amalteia até aproximadamente à órbita de Tebe a 221000 quilómetros.

Os anéis e luas de Júpiter estão dentro de uma cintura de radiação intensa de electrões e iões capturados no campo magnético do planeta. Estas partículas e campos compõem a magnetosfera joviana ou ambiente magnético, que se estendem até 3 a 7 milhões de quilómetros em direcção ao Sol, e que se estica em forma de manga de vento até à órbita de Saturno - uma distância de 750 milhões de quilómetros.

2.4.7.2 .Estatísticas de Júpiter

Massa (kg)	$1.900 \times 10^{+27}$
Massa (Terra = 1)	$3.1794 \times 10^{+02}$
Raio equatorial (km)	71 492
Raio equatorial (Terra = 1)	$1.1209 \times 10^{+01}$
Densidade média (gm/cm^3)	1.33
Distância média ao Sol (km)	778 330 000
Distância média ao Sol (Terra = 1)	5.2028
Período de rotação (dias)	0.41354
Período orbital (dias)	4332.71
Velocidade orbital média (km/seg)	13.07
Excentricidade orbital	0.0483
Inclinação do eixo (graus)	3.13
Inclinação orbital (graus)	1.308
Gravidade à superfície no equador (m/seg^2)	22.88
Velocidade de escape no equador (km/seg)	59.56
Albedo geométrico visual	0.52
Magnitude (Vo)	-2.70
Temperatura média das nuvens	-121°C
Pressão atmosférica (bars)	0.7
Composição atmosférica Hidrogénio Hélio	 90% 10%

Tabela 2.8 – Estatísticas de Júpiter

2.4.7.3. Resumo dos anéis de Júpiter

Nome	Distância*	Largura	Espessura	Massa	Albedo
Halo	92 000 km	30 500 km	20 000 km	?	0.05
Principal	122 500 km	6 440 km	< 30 km	1×10^{13} kg	0.05
Gossamer Interior	128 940 km	52 060 km	?	?	0.05
Gossamer Exterior	181 000 km	40 000 km	?	?	0.05

*A distância é medida do centro do planeta até ao início do anel.

Tabela 2.9 – Resumo dos anéis de Júpiter

2.4.7.4. Resumo das luas de Júpiter

Há cerca de quatro séculos Galileu Galilei virou o seu telescópio, feito em casa, para os céus e descobriu três pontos luminosos, que primeiro pensou serem estrelas, ligados ao planeta Júpiter. Estas estrelas estava alinhadas com Júpiter. Despertando o seu interesse, Galileu observou as estrelas e descobriu que elas se moviam na direcção errada. Quatro dias mais tarde apareceu outra estrela. Depois de observar as estrelas durante as semanas seguintes, Galileu concluiu que não eram estrelas mas corpos planetários em órbita à volta de Júpiter. Estas quatro estrelas passaram a ser conhecidas por Satélites Galileanos.

Durante os séculos seguintes foram descobertas outras 12 luas, obtendo-se um total de 16. Finalmente, em 1979, o mistério destes novos mundos congelados foi resolvido pelas sondas Voyager quando ultrapassaram o sistema de Júpiter. Ainda em 1996, a exploração destes mundos sofreu um grande avanço quando as naves Galileu iniciaram a sua longa missão de observação de Júpiter e das suas luas.

Doze das luas de Júpiter são relativamente pequenas e parecem mais ter sido capturadas do que formadas em órbita à volta de Júpiter. As quatro maiores luas galileanas, Io, Europa, Ganímedes e Calisto, parecem ter sido formadas por agregação como parte do processo de formação do próprio Júpiter. A tabela seguinte sumaria o raio, massa, distância ao centro do planeta descobridor e data da descoberta de cada uma das luas de Júpiter:

Lua	#	Raio (km)	Massa (kg)	Distância (km)	Descobridor	Data
Metis	XVI	20	$9.56 \times 10^{+16}$	127 969	S. Synnott	1979
Adrástea	XV	12.5x10x7.5	$1.91 \times 10^{+16}$	128 971	Jewitt-Danielson	1979
Amalteia	V	135x84x75	$7.17 \times 10^{+18}$	181 300	E. Barnard	1892
Tebe	XIV	55x45	$7.77 \times 10^{+17}$	221 895	S. Synnott	1979
Io	I	1,815	$8.94 \times 10^{+22}$	421 600	Marius-Galileo	1610
Europa	II	1,569	$4.80 \times 10^{+22}$	670 900	Marius-Galileo	1610
Ganímedes	III	2,631	$1.48 \times 10^{+23}$	1 070 000	Marius-Galileo	1610
Calisto	IV	2,400	$1.08 \times 10^{+23}$	1 883 000	Marius-Galileo	1610
Leda	XIII	8	$5.68 \times 10^{+15}$	11 094 000	C. Kowal	1974
Himalia	VI	93	$9.56 \times 10^{+18}$	11 480 000	C. Perrine	1904
Lisitea	X	18	$7.77 \times 10^{+16}$	11 720 000	S. Nicholson	1938
Elara	VII	38	$7.77 \times 10^{+17}$	11 737 000	C. Perrine	1905
Ananke	XII	15	$3.82 \times 10^{+16}$	21 200 000	S. Nicholson	1951
Carme	XI	20	$9.56 \times 10^{+16}$	22 600 000	S. Nicholson	1938
Pasifaé	VIII	25	$1.91 \times 10^{+17}$	23 500 000	P. Melotte	1908
Sinope	IX	18	$7.77 \times 10^{+16}$	23 700 000	S. Nicholson	1914

Tabela 2.10 – Resumo das luas de Júpiter

2.4.8. Saturno



É difícil dizer o que é impossível, porque o sonho de ontem é a esperança de hoje e a realidade de amanhã. - Robert Goddard

Saturno é o sexto planeta a partir do Sol e o segundo maior no sistema solar com um diâmetro equatorial de 120 536 Km. Muito do que se sabe sobre o planeta é devido às explorações da Voyager em 1980-81. Saturno é visivelmente achatado nos pólos, como resultado da rotação muito rápida do planeta no seu eixo. O seu dia dura 10 horas e 39 minutos, e demora cerca de 29.5 anos terrestres para dar a volta ao Sol. A atmosfera é principalmente composta por hidrogénio com pequenas quantidades de hélio e metano. Saturno é o único planeta menos denso do que a água (cerca de 30 porcento menos). No hipotético caso de se encontrar um oceano suficientemente grande, Saturno flutuaria nele. A coloração amarela enevoada de Saturno é marcada por largas faixas atmosféricas semelhantes, mas mais fracas, às de Júpiter.

O vento sopra em altas velocidades, em Saturno. Perto do equador, atinge uma velocidade de 500 metros por segundo. O vento sopra principalmente na direcção leste. Encontram-se os ventos mais fortes perto do equador e a velocidade decresce uniformemente a maiores latitudes. A latitudes superiores a 35 graus, os ventos alternam entre leste e oeste conforme a latitude aumenta.

O sistema de anéis de Saturno faz do planeta um dos mais belos objectos no sistema solar. Os anéis estão divididos em diferentes partes, que incluem os anéis brilhantes A e B e um anel C mais fraco. O sistema de anéis tem diversos espaçamentos. O espaçamento mais notável é a Divisão Cassini, que separa os anéis A e B. Giovanni Cassini descobriu esta divisão em 1675. A Divisão Encke, que divide o anel A, teve o seu nome baseado em Johann Encke, que a descobriu em 1837. As sondas espaciais mostraram que os anéis principais são na realidade formados por um grande número de anéis pequenos e estreitos. A origem dos anéis é obscura. Pensa-se que os anéis podem ter sido formados a partir das grandes luas que foram desfeitas pelo impacto de cometas e meteoróides. A composição exacta dos anéis não é conhecida, mas mostram que contêm uma grande quantidade de água. Podem ser compostos por icebergs e/ou bolas de gelo desde poucos centímetros até alguns metros de diâmetro. Muita da estrutura elaborada de alguns dos anéis é devida aos efeitos

gravitacionais dos satélites vizinhos. Este fenómeno é demonstrado pela relação entre o anel F e duas pequenas luas que *pastoreiam* a matéria do anel. Também foram encontradas formações radiais no grande anel B pelas sondas Voyager. Pensa-se que as formações são compostas por partículas finas, do tamanho de grãos de pó. Entre as imagens obtidas pelas sondas Voyager observou-se a formação e a dissipação dos raios. Apesar das cargas electrostáticas poderem criar raios pela levitação das partículas de pó acima do anel, a causa exacta da formação destes raios não está bem compreendida. Saturno tem 18 luas confirmadas, o maior número de satélites de qualquer planeta do sistema solar. Em 1995, os cientistas, usando o Telescópio Espacial Hubble, descobriram quatro objectos que podem também ser luas.

2.4.8.1 Os Anéis de Saturno

Nome	Distância*	Largura	Espessura	Massa	Albedo
D	67 000 km	7 500 km	?	?	?
C	74 500 km	17 500 km	?	$1.1x10^{18}$ kg	0.25
Div.Maxwell	87 500 km	270 km			
B	92 000 km	25 500 km	0.1-1 km	$2.8x10^{19}$ kg	0.65
Div.Cassini	117 500 km	4 700 km	?	$5.7x10^{17}$ kg	0.30
A	122 200 km	14 600 km	0.1-1 km	$6.2x10^{18}$ kg	0.60
Div.Encke	133 570 km	325 km			
Div.Keeler	136 530 km	35 km			
F	140 210 km	30-500 km	?	?	?
G	165 800 km	8 000 km	100-1000 km	$6\text{-}23x10^{6}$ kg	?
E	180 000 km	300 000 km	1 000 km	?	?

*A distância é medida do centro do planeta até ao início do anel.

Tabela 2.11 – Resumo dos anéis de Saturno

2.4.8.2 Estatísticas de Saturno

Estatísticas de Saturno	
Massa (kg)	$5.688 \times 10^{+26}$
Massa (Terra = 1)	$9.5181 \times 10^{+01}$
Raio Equatorial (km)	60 268
Raio Equatorial (Terra = 1)	$9.4494 \times 10^{+00}$
Densidade Média (gm/cm^3)	0.69
Distância média do Sol (km)	1 429 400 000
Distância média do Sol (Terra = 1)	9.5388
Período rotacional (horas)	10.233
Período orbital (anos)	29.458
Velocidade média orbital (km/seg)	9.67
Excentricidade orbital	0.0560
Inclinação do eixo (graus)	25.33
Inclinação orbital (graus)	2.488
Gravidade à superfície no equador (m/seg^2)	9.05
Velocidade de escape no equador (km/seg)	35.49
Albedo geométrico visual	0.47
Magnitude (Vo)	0.67
Temperatura média das nuvens	-125°C
Pressão atmosférica (bars)	1.4
Composição atmosférica Hidrogénio Hélio	 97% 3%

Tabela 2.12 – Estatísticas de Saturno

2.4.8.3. Resumo das Luas de Saturno

Saturno tem 18 satélites oficialmente reconhecidos. Além disso, há outros satélites não confirmados. Um circula na órbita de Dione, um segundo está localizado entre as órbitas de Tétis e Dione, e um terceiro está localizado entre Dione e Rea. Os satélites não confirmados foram encontrados nas fotografias da Voyager, mas não foram confirmados em nenhuma outra vista. Recentemente, o Telescópio Espacial Hubble obteve imagens de quatro objectos que podem ser novas luas. Podem ser feitas algumas generalizações acerca dos satélites de

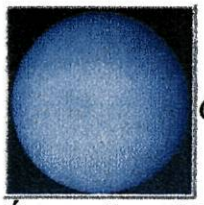
Saturno. Apenas Titã tem uma atmosfera apreciável. Muitos dos satélites têm uma rotação síncrona. As excepções são Hiperion, que tem uma órbita caótica, e Febe. Saturno tem um sistema de satélites regular. Isto é, os satélites têm órbitas quase circulares no plano equatorial. As duas excepções são Japeto e Febe. Todos os satélites têm uma densidade de < 2 gm/cm^3. Isto indica que eles são compostos por 30 a 40% de rochas e 60 a 70% de água gelada. Muitos dos satélites reflectem 60 a 90% da luz que os atinge. Os quatro satélites exteriores reflectem menos do que isto e Febe reflecte apenas 2% da luz que o atinge.

A tabela seguinte resume o raio, massa, distância ao centro do planeta, descobridor e data da descoberta de cada um dos satélites confirmados de Saturno:

Lua	#	Raio(km)	Massa(kg)	Distância(km)	Descobridor	Data
Pan	XVIII	9.655	?	133 583	M. Showalter	1990
Atlas	XV	20x15	?	137 640	R. Terrile	1980
Prometeu	XVI	72.5x42.5x32.5	$2.7 \times 10^{+17}$	139 350	S. Collins	1980
Pandora	XVII	57x42x31	$2.2 \times 10^{+17}$	141 700	S. Collins	1980
Epimeteu	XI	72x54x49	$5.6 \times 10^{+17}$	151 422	R. Walker	1966
Jano	X	98x96x75	$2.01 \times 10^{+18}$	151 472	A. Dollfus	1966
Mimas	I	196	$3.80 \times 10^{+19}$	185 520	W. Herschel	1789
Encelado	II	250	$8.40 \times 10^{+19}$	238 020	W. Herschel	1789
Tétis	III	530	$7.55 \times 10^{+20}$	294 660	G. Cassini	1684
Telesto	XIII	17x14x13	?	294 660	B. Smith	1980
Calipso	XIV	17x11x11	?	294 660	B. Smith	1980
Dione	IV	560	$1.05 \times 10^{+21}$	377 400	G. Cassini	1684
Helena	XII	18x16x15	?	377 400	Laques-Lecacheux	1980
Rea	V	765	$2.49 \times 10^{+21}$	527 040	G. Cassini	1672
Titan	VI	2,575	$1.35 \times 10^{+23}$	1 221 850	C. Huygens	1655
Hiperion	VII	205x130x110	$1.77 \times 10^{+19}$	1 481 000	W. Bond	1848
Japeto	VIII	730	$1.88 \times 10^{+21}$	3 561 300	G. Cassini	1671
Febe	IX	110	$4.0 \times 10^{+18}$	12 952 000	W. Pickering	1898
Novos Possíveis Satélites de Saturno						

Tabela 2.13 – Resumo das luas de Saturno

2.4.9. Urano



O importante é nunca parar de questionar.- Albert Einstein

Úrano é o sétimo planeta a partir do Sol e é o terceiro maior no sistema solar. Foi descoberto por William Herschel em 1781. Tem um diâmetro equatorial de 51800 Km e orbita o Sol em 84.01 anos terrestres. A distância média ao Sol é 2.87 biliões de quilómetros. A duração de um dia em Urano é 17 horas e 14 minutos. Urano tem pelo menos 21 luas. As duas maiores luas, Titânia e Oberon, foram descobertas por William Herschel em 1787.

A atmosfera de Urano é composta por 83% de hidrogénio, 15% de hélio, 2% de metano e pequenas porções de acetileno e outros hidrocarbonetos. O metano na alta atmosfera absorve a luz vermelha, dando a Urano a sua cor azul-esverdeada. A atmosfera está organizada em nuvens que se mantêm em altitudes constantes, semelhantes à orientação das faixas latitudinais vistas em Júpiter e Saturno. Os ventos a meia-latitude em Urano sopram na direcção da rotação do planeta. Estes ventos sopram a velocidades de 40 a 160 metros por segundo. Experiências com sinais de rádio registaram ventos de cerca de 100 metros por segundo soprando na direcção oposta no equador.

Urano distingue-se pelo facto de estar inclinado para um lado (98º). Pensa-se que a sua posição invulgar é resultado da colisão com um corpo do tamanho de um planeta no início da história do sistema solar. A Voyager 2 descobriu que uma das influências mais notáveis desta posição inclinada é o seu efeito na cauda do campo magnético, que por sua vez está inclinado 60 graus em relação ao eixo de rotação. A cauda magnética mostrou-se torcida pela rotação do planeta numa forma em espiral atrás do planeta. A origem do campo magnético é desconhecida; O oceano de água e amónia electricamente conductivo e super - pressurizado que se pensava estar entre o núcleo e a atmosfera, não existe. Crê-se que os campos magnéticos da Terra e de outros planetas provêm de correntes eléctricas produzidas pelos seus núcleos fundidos.

2.4.9.1 Os Anéis de Urano

Em 1977, foram descobertos os primeiros nove anéis de Urano. Durante os encontros da Voyager, estes anéis foram fotografados e medidos, tal como outros dois anéis. Os anéis de Urano são muito diferentes dos de Júpiter e Saturno. O anel *épsilon* exterior é composto principalmente por blocos de gelo com dimensões até 10 metros de diâmetro. Uma distribuição muito ténue de poeira fina também parece estar dispersa pelo sistema de anéis.

Pode existir um grande número de anéis estreitos, ou possivelmente anéis incompletos ou arcos de anéis, mesmo com 50 metros de largura. Descobriu-se que as partículas individuais dos anéis são de baixa reflectividade. Descobriu-se que pelo menos um anel, o épsilon, tem a cor cinzenta. As luas Cordélia e Ofélia agem como satélites pastores para o anel épsilon.

2.4.9.2 Os Anéis de Urano

Nome	Distância*	Largura	Espessura	Massa	Albedo
1986U2R	38 000 km	2,500 km	0.1 km	?	0.03
6	41 840 km	1-3 km	0.1 km	?	0.03
5	42 230 km	2-3 km	0.1 km	?	0.03
4	42 580 km	2-3 km	0.1 km	?	0.03
Alpha	44 720 km	7-12 km	0.1 km	?	0.03
Beta	45 670 km	7-12 km	0.1 km	?	0.03
Eta	47 190 km	0-2 km	0.1 km	?	0.03
Gamma	47 630 km	1-4 km	0.1 km	?	0.03
Delta	48 290 km	3-9 km	0.1 km	?	0.03
1986U1R	50 020 km	1-2 km	0.1 km	?	0.03
Epsilon	51 140 km	20-100 km	< 0.15 km	?	0.03

*A distância é medida do centro do planeta ao início do anel.

Tabela 2.14 – Resumo dos anéis de Urano

2.4.9.3. Estatísticas de Urano

Estatísticas de Urano	
Descoberto por	William Herschel
Data da descoberta	1781
Massa (kg)	$8.686 \times 10^{+25}$
Massa (Terra = 1)	$1.4535 \times 10^{+01}$
Raio equatorial (km)	25 559
Raio equatorial (Terra = 1)	4.0074
Densidade média (gm/cm^3)	1.29
Distância média ao Sol (km)	2 870 990 000
Distância média ao Sol (Terra = 1)	19.1914
Período de rotação (horas)	-17.9
Período orbital (anos)	84.01
Velocidade orbital média (km/seg)	6.81
Excentricidade orbital	0.0461
Inclinação do eixo (graus)	97.86
Inclinação orbital (graus)	0.774
Gravidade à superfície no equador (m/seg^2)	7.77
Velocidade de escape no equador (km/seg)	21.30
Albedo geométrico visual	0.51
Magnitude (Vo)	5.52
Temperatura média das nuvens	-193°C
Pressão atmosférica (bars)	1.2
Composição atmosférica	
Hidrogénio	83%
Hélio	15%
Metano	2%

Tabela 2.15 – Estatísticas de Urano

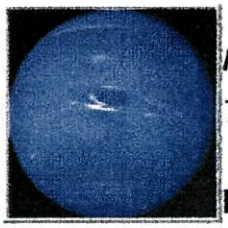
2.4.9.4. Resumo das Luas de Urano

A tabela seguinte resume o raio, massa, distância ao centro do planeta, descobridor e data da descoberta de cada uma das luas de Urano:

Lua	#	Raio (km)	Massa (kg)	Distância (km)	Descobridor	Data
Cordélia	VI	13	?	49 750	Voyager 2	1986
Ofélia	VII	16	?	53 760	Voyager 2	1986
Bianca	VIII	22	?	59 160	Voyager 2	1986
Cressida	IX	33	?	61 770	Voyager 2	1986
Desdemona	X	29	?	62 660	Voyager 2	1986
Julieta	XI	42	?	64 360	Voyager 2	1986
Portia	XII	55	?	66 100	Voyager 2	1986
Rosalinda	XIII	27	?	69 930	Voyager 2	1986
Belinda	XIV	34	?	75 260	Voyager 2	1986
1986U10	XVIII	20	?	75 000	Karkoschka	1999
Puck	XV	77	?	86 010	Voyager 2	1985
Miranda	V	235.8	$6.33 \times 10^{+19}$	129 780	G. Kuiper	1948
Ariel	I	578.9	$1.27 \times 10^{+21}$	191 240	W. Lassell	1851
Umbriel	II	584.7	$1.27 \times 10^{+21}$	265 970	W. Lassell	1851
Titânia	III	788.9	$3.49 \times 10^{+21}$	435 840	W. Herschel	1787
Oberon	IV	761.4	$3.03 \times 10^{+21}$	582 600	W. Herschel	1787
Caliban	XVI	30	?	7 100 000	Gladman	1997
1999U1	XIX	20	?	10 000 000	Kavelaars	1999
Sycorax	XVII	60	?	12 200 000	Nicholson	1997
1999U2	XX	15	?	25 000 000	Gladman	1999
1999U3	XXI	20	?		Holman	1999

Tabela 2.16 – Resumo das luas de Urano

2.4.10. Neptuno



Na longa corrida os homens apenas atingem aquilo a que aspiram. - Thoreau

Neptuno é o planeta mais externo dos gigantes de gás. Tem um diâmetro equatorial de 49500 quilómetros. Se Neptuno fosse oco, poderia conter cerca de 60 Terras. Neptuno orbita o Sol em 165 anos. Tem oito luas, seis das quais foram descobertas pela Voyager. Um dia em Neptuno dura 16 horas e 6.7 minutos. Neptuno foi descoberto em 23 de Setembro de 1846 por Johann Gottfried_Galle, do Observatório de Berlim, e Louis d'Arrest, um estudante de astronomia, através de predições matemáticas feitas por Urbain Jean Joseph Le Verrier.

Os primeiros dois terços de Neptuno são compostos por uma mistura de rocha fundida, água, amónia líquida e metano. O terço externo é uma mistura de gases aquecidos compostos por hidrogénio, hélio, água e metano. O metano absorve a luz vermelha e dá a Neptuno a sua cor de nuvem azul.

Neptuno é um planeta dinâmico com diversas manchas grandes e escuras, lembrando as tempestades, tipo furacões, de Júpiter. A maior mancha, conhecida por *Grande Mancha Escura*, tem aproximadamente o tamanho da Terra e é semelhante à *Grande Mancha Vermelha* de Júpiter. A Voyager mostrou uma nuvem pequena, de forma irregular, movendo-se para leste *correndo* à volta de Neptuno a cada 16 horas ou quase. Esta *scooter* tal como foi denominada pode ser uma bruma que se eleva acima de um conjunto de nuvens mais escuras. Foram vistas na atmosfera de Neptuno nuvens grandes e brilhantes, semelhantes às nuvens terrestres. A latitudes mais baixas a norte, a Voyager capturou imagens de raios de nuvens projectando as sombras nas formações de nuvens mais baixas.

Os ventos mais fortes de qualquer planeta foram medidos em Neptuno. Muitos dos ventos sopram na direcção oeste, oposta à rotação do planeta. Perto da Grande Mancha Escura, os ventos sopram próximo dos 2 000 Km por hora.

Neptuno tem um conjunto de quatro anéis que são estreitos e muito fracos. Os anéis são constituídos por partículas de pó, que se pensava terem surgido de pequenos meteoritos que se esmagaram nas luas de Neptuno. Vistos de telescópios terrestres, os anéis parecem ser arcos, mas vistos da Voyager 2 os

arcos surgem como manchas brilhantes ou aglomerações no sistema de anéis. A causa exacta das aglomerações brilhantes é desconhecida.

O campo magnético de Neptuno, tal como o de Urano, tem uma inclinação muito acentuada de 47 graus em relação ao eixo de rotação e está deslocado de pelo menos 0.55 raios (cerca de 13,500Km) do centro físico. Comparando o campo magnético dos dois planetas, os cientistas pensam que a orientação extrema pode ser característica de correntes no interior e não o resultado da orientação lateral ou de qualquer reversão do campo de ambos os planetas.

2.4.10.1 Estatísticas de Neptuno

Estatísticas de Neptuno	
Descoberto por	Johann Gotfried Galle
Data da descoberta	23 de Setembro de 1846
Massa (kg)	$1.024 \times 10^{+26}$
Massa (Terra = 1)	$1.7135 \times 10^{+01}$
Raio equatorial (km)	24 746
Raio equatorial (Terra = 1)	$3\ 8799 \times 10^{+00}$
Densidade média (gm/cm^3)	1.64
Distância média do Sol (km)	4 504 300 000
Distância média do Sol (Terra = 1)	30.0611
Período rotacional (horas)	16.11
Período orbital (anos)	164.79
Velocidade média orbital (km/seg)	5.45
Excentricidade orbital	0.0097
Inclinação do eixo (graus)	28.31
Inclinação orbital (graus)	1.774
Gravidade equatorial à superfície (m/seg^2)	11.0
Velocidade de escape no equador (km/seg)	23.50
Albedo visual geométrico	0.41
Magnitude (Vo)	7.84
Temperatura média das nuvens	-193 a -153°C
Pressão atmosférica (bars)	1-3
Composição atmosférica Hidrogénio Hélio Metano	 85% 13% 2%

Tabela 2.17 – Estatísticas de Neptuno

2.4.10.2 Os anéis de Neptuno.

Nome	Distância*	Largura	Espessura	Massa	Albedo
1989N3R	41 900 km	15 km	?	?	baixo
1989N2R	53 200 km	15 km	?	?	baixo
1989N4R	53 200 km	5,800 km	?	?	baixo
1989N1R	62 930 km	< 50 km	?	?	baixo

*A distância é medida no centro do planeta ao início do anel.

Tabela 2.18 – Resumo dos anéis de Neptuno

2.4.10.3 Resumo das Luas de Neptuno

A seguinte tabela resume o raio, massa, distância ao centro do planeta, quem descobriu e a data da descoberta de cada uma das luas de Neptuno:

Lua	#	Raio (km)	Massa (kg)	Distância (km)	Descobridor	Data
Naiad	III	29	?	48 000	Voyager 2	1989
Thalassa	IV	40	?	50 000	Voyager 2	1989
Despina	V	74	?	52 500	Voyager 2	1989
Galateia	VI	79	?	62 000	Voyager 2	1989
Larissa	VII	104x89	?	73 600	Voyager 2	1989
Proteus	VIII	200	?	117 600	Voyager 2	1989
Tritão	I	1 350	2.14e+22	354 800	W. Lassell	1846
Nereid	II	170	?	5 513 400	G. Kuiper	1949

Tabela 2.19 – Resumo das luas de Neptuno

2.4.11 Plutão



Vem comigo, disse ela, por regiões inexploradas; e lê o que ainda está por ler nos manuscritos de Deus - Longfellow

Apesar de Plutão ter sido descoberto em 1930, as informações limitadas em relação a este planeta distante provocaram um atraso na compreensão das suas características. Actualmente Plutão é o único planeta que ainda não foi visitado por uma sonda, no entanto a existência de cada vez mais informações está a abrir-nos este planeta peculiar. A unicidade da órbita de Plutão, a relação entre a sua rotação e a do satélite, o eixo de rotação e as variações de luz dão ao planeta um "charme" especial.

Plutão está normalmente mais longe do Sol do que qualquer dos outros planetas; no entanto, devido à excentricidade da sua órbita, está mais próximo do que Neptuno durante 20 anos dos 249 da sua órbita. Plutão atravessou a órbita de Neptuno em 21 de Janeiro de 1979, teve a sua maior aproximação em 5 de Setembro de 1989 e permaneceu dentro da órbita de Neptuno até 11 de Fevereiro de 1999. Este facto só ocorrerá de novo em Setembro de 2226.

À medida que Plutão se aproxima do periélio, atinge a sua distância máxima da eclíptica devido à sua inclinação de 17 graus. Por isso, está muito acima ou abaixo do plano da órbita de Neptuno. Nestas condições, Plutão e Neptuno não colidem nem se aproximam mais de 18 U.A. um do outro.

O período de rotação de Plutão é de 6.387 dias, o mesmo do seu satélite Caronte. Apesar de ser normal um satélite viajar numa órbita síncrona com o seu planeta, Plutão é o único planeta que roda sincronamente com a órbita do seu satélite. Por estarem gravitacionalmente bloqueados, Plutão e Caronte têm a mesma face continuamente virada um para o outro enquanto viajam pelo espaço.

Ao contrário da maior parte dos planetas, mas semelhante a Urano, Plutão roda com os seus pólos quase no plano orbital. O eixo de rotação de Plutão está inclinado 122°. Quando Plutão foi descoberto, a região do seu pólo relativamente brilhante era vista da Terra. Plutão parecia diminuir de luminosidade enquanto o nosso ponto de vista gradualmente se desviava de

próximo do pólo em 1954 até próximo do equador em 1973. O equador de Plutão é o que se vê agora da Terra.

Durante o período entre 1985 e 1990, a Terra estava alinhada com a órbita de Caronte à volta de Plutão de tal forma que podia ser observado um eclipse em cada dia de Plutão. Este facto deu oportunidades para obter informações significativas que levou ao desenho de mapas de albedo que definem a reflectividade da superfície, e à primeira determinação mais exacta das dimensões de Plutão e de Caronte, incluindo todos os dados que poderiam daí ser calculados.

Os primeiros eclipses (mútuos) começaram a bloquear a região polar norte. Os eclipses seguintes bloquearam a região equatorial e os eclipses restantes bloquearam a região polar sul de Plutão. Medindo cuidadosamente o brilho durante todo este tempo, foi possível determinar formações de superfície. Descobriu-se que Plutão tem uma calote polar sul muito reflectiva, uma calote polar norte mais fraca e formações brilhantes e escuras na região do equador. O albedo geométrico de Plutão é de 0.49 a 0.66, que é muito mais brilhante do que Caronte. O albedo de Caronte varia de 0.36 a 0.39.

Os eclipses duraram cerca de quatro horas e pela medida cuidadosa dos inícios e dos fins, foram obtidas medições dos seus diâmetros. Os diâmetros também podem ser medidos directamente com um erro de 1% por imagens mais recentes obtidas pelo Telescópio Espacial Hubble. Estas imagens conseguem uma resolução que mostra claramente os dois objectos como dois discos separados. As ópticas melhoradas permitem-nos medir o diâmetro de Plutão com 2274 quilómetros e o diâmetro de Caronte com 1172 quilómetros, pouco mais de metade da dimensão de Plutão. A sua separação média é de 19640 km, aproximadamente oito diâmetros de Plutão.

A separação média e o período orbital são usados para calcular as massas de Plutão e de Caronte. A massa de Plutão é cerca de 6.4×10^{-9} massas solares. Esta é quase 7 (era 12) vezes a massa de Caronte e aproximadamente 0.0021 da massa da Terra, ou um quinto da nossa lua.

A densidade média de Plutão está entre 1.8 e 2.1 g/cm^3. Conclui-se que Plutão é 50% a 75% de rocha misturada com gelos. A densidade de Caronte é 1.2 a 1.3 g/cm^3, indicando que contém poucas rochas. As diferenças de densidade dizem-nos que Plutão e Caronte foram formados independentemente, apesar dos

valores de Caronte obtidos do TEH serem ainda contrariados pelas observações terrestres. As origens de Plutão e de Caronte permanecem no reino da teoria.

A superfície gelada de Plutão é composta por 98% de nitrogénio (N2). Também estão presentes metano (CH4) e traços de monóxido de carbono (CO). O metano sólido indica que Plutão tem uma temperatura inferior a 70ºK. A temperatura de Plutão varia muito durante o percurso da sua órbita porque Plutão pode-se aproximar do Sol até 30 UA e afastar até 50 UA. Existe uma ténue atmosfera que congela e cai na superfície quando o planeta se afasta do Sol. A NASA planeia lançar uma sonda, o Expresso de Plutão, em 2001 que permitirá aos cientistas estudarem o planeta antes da atmosfera congelar. A pressão atmosférica deduzida à superfície de Plutão é 1/100000 da pressão à superfície da Terra.

Plutão foi oficialmente etiquetado como o nono planeta pela União Astronómica Internacional em 1930 e recebeu o nome do deus romano do submundo. Foi o primeiro e único planeta a ser descoberto por um americano, Clyde W. Tombaugh.

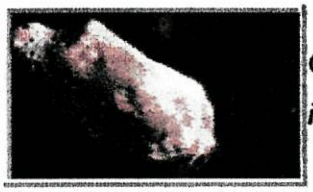
O caminho que levou à sua descoberta é atribuído a Percival Lowell que fundou o Observatório Lowell em Flagstaff, Arizona, e custeou três pesquisas separadas do "Planet X". Lowell fez numerosos cálculos para o encontrar, sem sucesso, acreditando que ele poderia ser detectado pelo efeito que provoca na órbita de Neptuno. Dr. Vesto Slipher, o director do observatório, contratou Clyde Tombaugh para a terceira pesquisa e Clyde obteve vários conjuntos de fotografias do plano do sistema solar (eclíptica) com uma a duas semanas de separação e procurou alguma coisa que se tivesse deslocado em relação ao fundo estrelado. Esta aproximação sistemática teve sucesso e Plutão foi descoberto por este jovem (nascido em 4 de Fevereiro de 1906) de 24 anos assistente do laboratório do Kansas em 18 de Fevereiro de 1930. Plutão é na verdade pequeno demais para ser o "Planet X" que Percival Lowell esperou encontrar.

2.4.11.1 Estatísticas de Plutão

Estatísticas de Plutão	
Descoberto por	Clyde W. Tombaugh
Data da descoberta	18 de Fevereiro de 1930
Massa (kg)	$1.27 \times 10^{+22}$
Massa (Terra = 1)	2.125×10^{-03}
Raio equatorial (km)	1,137
Raio equatorial (Terra = 1)	0.1783
Densidade média (gm/cm^3)	2.05
Distância média ao Sol (km)	5 913 520 000
Distância média ao Sol (Terra = 1))	39.5294
Período rotacional (dias)	-6.3872
Período orbital (anos)	248.54
Velocidade orbital média (km/seg)	4.74
Excentricidade orbital	0.2482
Inclinação do eixo (graus)	122.52
Inclinação orbital (graus)	17.148
Gravidade à superfície no equador (m/seg^2)	0.4
Velocidade de escape no equador (km/seg)	1.22
Albedo geométrico visual	0.3
Magnitude (Vo)	15.12
Composição atmosférica Metano Azoto	0.3

Tabela 2.19 – Estatísticas de Plutão

2.4.12 Os Asteróides



O futuro não pode ser previsto, mas os futuros podem ser inventados. - Dennis Gabor

Na região entre Marte e Jupiter....Cinturão de Asteróides...Situado a 2,7UA (22 minutos-luz)

2.4.12.1 Origem - A Lei de Titus-Bode (1766)

Estabeleceu-se no século XVIII uma relação empírica que nos fornece aproximadamente as distâncias dos planetas ao Sol. Essa relação foi difundida pelo astrónomo alemão Johann Daniel Titus (1725-1796) na tradução da obra *Completation de la Nature* de C. Bonnet para o alemão. Nela continha a *lei de Bode* desenvolvida por Johann Elert Bode (1747-1826). Ambos, Titius e Bode, trabalhando em colaboração aperfeiçoaram a relação hoje conhecida como a Lei de Títus-Bode cujos resultados se apresentam:

Planeta	n	a	Distância Média Real
Mercúrio		0,4	0,39
Vénus	0	0,7	0,72
Terra	1	1,0	1,00
Marte	2	1,6	1,52
1.Ceres (*)	3	2,8	2,77
Júpiter	4	5,2	5,20
Saturno	5	10,0	9,54
Urano	6	19,6	19,18
Neptuno		-----	30,06
Plutão	7	38,8	39,52

Tabela 2.20 Resultados da Lei de Titius-Bode (1766)

$$a = 0.4 + 0.3 \times 2^n \quad \text{onde } n = -\infty, 0, 1, 2, 3, \ldots$$

a = distância astronómica (ua)

Distância da Terra ao Sol = 1 ua

A relação empírica não prevê o planeta Neptuno, mas levantou suspeitas sobre a existência de objectos entre Marte e Júpiter. Suscitou a existência de mais dois objectos além de Saturno.

O planeta Urano foi descoberto em 13 de Março de 1781 por Willian Herschel e o nome Urano ao planeta deve-se a uma sugestão dada por Bode.

Voltando ao asteróides, com n=3 temos a=2,8 e em 1 de Janeiro de 1801 o siciliano Giuzeppe Piazzi descobriu um objecto -CERES- entre Marte e Júpiter à distância de 2,77 unidades astronómicas do Sol e com um diâmetro de 1000km. Um objecto muito pequeno para ser classificado como planeta. Após essa descoberta, muitos outros corpos menores foram descobertos e hoje já são conhecidos mais de 5000 asteróides entre Marte e Júpiter.

A maior polémica com relação a estes asteróides é quanto à sua origem. São duas as principais teorias a esse respeito. A primeira, defende que foi um planeta, que por anomalias gravitacionais se tenha fragmentado e a segunda defende que esses pequenos objectos são resquícios da nebulosa que deu origem ao sistema solar e que não encontraram condições para se colapsarem e formar um planeta. Mas o mais provável é, que sejam materiais que nunca se fundiram num planeta. De facto, se a massa total calculada de todos os asteróides fosse junta num único objecto, este teria menos de 1500 Km de diâmetro – menos de metade do diâmetro da Lua.

O período médio de rotação é dez horas, porém com ampla variação de duas horas até vários dias. A densidade estimada é de cerca de $2g/cm^3$. A forma dos asteróides é bem variada. Vão desde irregulares e disformes, elipsóides, cilíndricos, até esféricos. Todos aqueles com tamanhos significativos detêm uma grande quantidade de crateras, pois são frequentes os choques entre eles, apesar da baixa densidade de partículas em relação ao espaço.

Asteróides são objectos rochosos e metálicos que orbitam o Sol mas são pequenos demais para serem considerados planetas. São conhecidos por *planetas menores.* A dimensão dos asteróides varia desde Ceres, que tem um diâmetro de cerca de 1000 km, até à dimensão de pequenas pedras. Dezasseis asteróides têm um diâmetro de 240 km ou mais. Foram descobertos desde o interior da órbita da Terra até para lá da órbita de Saturno. Muitos, porém, estão

dentro de uma *cintura* que existe entre as órbitas de Marte e de Júpiter. Alguns têm órbitas que atravessam a órbita da Terra e alguns atingiram até a Terra em tempos passados. Um dos exemplos mais bem conservados é a Cratera de Meteoro Barringer perto de Winslow, Arizona, EUA.

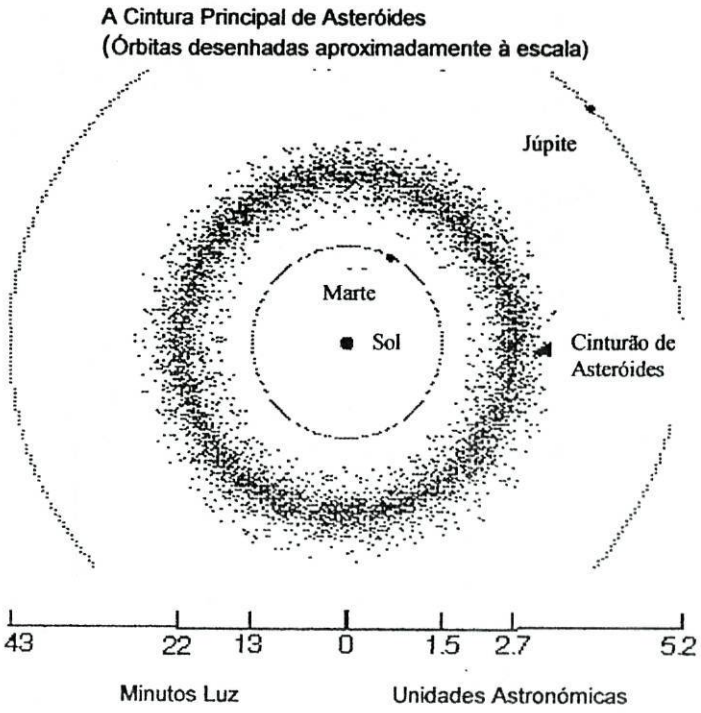


Figura 2.11 – Esquema de localização do Cinturão de Asteróides

Muito do nosso conhecimento acerca dos asteróides vem do exame das rochas e dos fragmentos do espaço que caem na superfície da Terra. Os asteróides que estão numa rota de colisão com a Terra são chamados meteoróides. Quando um meteoróide atinge a nossa atmosfera em alta velocidade, a fricção provoca a incineração desta porção de matéria espacial, provocando um raio de luz conhecido por meteoro. Se um meteoróide não arde completamente, o que resta atinge a superfície da Terra e é chamado um meteorito.

De todos os meteoritos examinados, 92.8% são compostos de silicato (pedra), e 5.7% são compostos por ferro e níquel; o restante é uma mistura dos três materiais. Meteoritos de pedra são os mais difíceis de identificar porque parecem-se muito com rochas terrestres.

Porque os meteoritos são matéria do início do sistema solar, os cientistas estão interessados na sua composição. As sondas espaciais que passaram pela

cintura de asteróides descobriram que a cintura é bastante vazia e que os asteróides estão separados de grandes distâncias. Antes de 1991, a única informação obtida dos asteróides era das observações terrestres. Em Outubro de 1991, o asteróide 951 Gaspra foi visitado pela sonda Galileo e tornou-se no primeiro asteróide a ter fotos em alta resolução. Em Agosto de 1993 Galileo aproximou-se do asteróide 243 Ida. Este foi o segundo asteróide a ser visitado por sondas espaciais. Tanto Gaspra como Ida estão classificados como asteróides do tipo S compostos por silicatos ricos em metais.

Em 27 de Junho de 1997 a sonda NEAR aproximou-se do asteróide 253 Mathilde. Este encontro deu aos cientistas a primeira vista em close-up de um asteróide do tipo C rico em carbono. Esta visita foi única porque NEAR não estava preparada para encontros em voo.

Alguns asteróides notáveis são Toutatis, Castalia, Geographos e Vesta. Os astrónomos estudaram Toutatis, Geographos e Castalia usando observações de radar da Terra durante as maiores aproximações ao nosso planeta. Vesta foi observado pelo Telescópio Espacial Hubble.

Cerca de 5000 asteróides têm sido catalogados desde 1801 e são adicionados cerca de 200 cada ano.

Actualmente ainda existem algumas questões em aberto:

Por que existem tantos asteróides entre Marte e Júpiter, em vez de um planeta?

Como é que os asteróides são empurrados das suas órbitas normais para dentro de órbitas que cruzam a Terra?

Qual a probabilidade de que um grande cometa ou asteróide choque com a Terra?

2.4.12.2 Resumo dos asteróides

Num.	Nome	Raio (km)	Distância* (10^6km)	Albedo	Descobridor	Data
1	Ceres	457	413.9	0.10	G. Piazzi	1801
511	Davida	168	475.4	0.05	R. Dugan	1903
15	Eunomia	136	395.5	0.19	De Gasparis	1851
52	Europa	156	463.3	0.06	Goldschmidt	1858
951	Gaspra	17x10	205.0	0.20	Neujmin	1916
10	Hygiea	215	470.3	0.08	De Gasparis	1849
243	Ida	58x23	270.0	?	J. Palisa	29 Set 1884
704	Interamnia	167	458.1	0.06	V. Cerulli	1910
2	Pallas	261	414.5	0.14	H. Olbers	1802
16	Psyche	132	437.1	0.10	De Gasparis	1852
87	Sylvia	136	521.5	0.04	N. Pogson	1866
4	Vesta	262.5	353.4	0.38	H. Olbers	1807

* Distância média ao Sol.

Tabela 2.21 – Resumo dos asteróides

2.4.13. Introdução aos Cometas



Cometas são corpos pequenos, frágeis e de formato irregular compostos por uma mistura de grãos não voláteis e gases congelados. Têm órbitas muito elípticas que os trazem próximo do Sol e os levam longe no espaço, por vezes para além da órbita de Plutão. A estrutura dos cometas é diversa e muito dinâmica, mas todos desenvolvem uma nuvem de matéria difusa, chamada coroa, que geralmente cresce em diâmetro e brilho quando o cometa se aproxima do Sol. Geralmente vê-se no meio da coroa um núcleo pequeno (menos de 10 km de diâmetro) e brilhante. A coroa e o núcleo juntos constituem a cabeça do cometa.

Quando os cometas se aproximam do Sol desenvolvem enormes caudas de matéria luminosa que se estendem por milhões de quilómetros da cabeça, na direcção oposta ao Sol. Quando estão longe do Sol, o núcleo está muito frio e a sua matéria está congelada dentro do núcleo. Neste estado os cometas são muitas vezes referidos por "icebergs sujos" ou "bolas de neve sujas", porque mais de metade do seu material é gelo. Quando o cometa se aproxima a menos de algumas UA do Sol, a superfície do núcleo começa a aquecer e volatiliza-se. As moléculas evaporadas carregam consigo partículas sólidas, formando a coroa do cometa, de gás e poeira. Quando o núcleo está congelado, pode ser visto apenas pela luz do Sol reflectida. No entanto, quando a coroa se desenvolve, as partículas de pó reflectem ainda mais luz solar, e o gás na coroa absorve a radiação ultravioleta e começa a florescer. A cerca de 5 UA do Sol, a fluorescência normalmente torna-se mais intensa do que a luz reflectida. Enquanto o cometa absorve luz ultravioleta, os processos químicos libertam hidrogénio, que escapa à gravidade do cometa, e forma um invólucro de hidrogénio. Este invólucro não pode ser visto da Terra porque a sua luz é

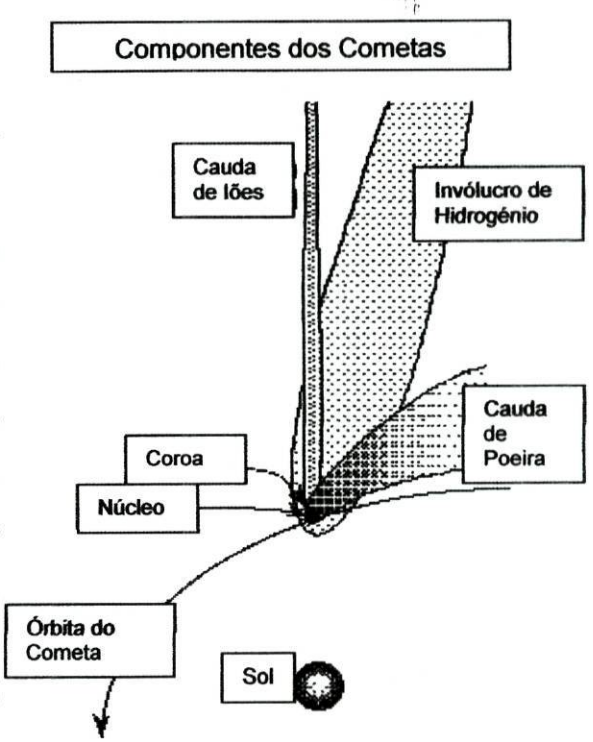


Figura 3.12 – Esquema de um cometa

absorvida pela nossa atmosfera, mas foi detectado pelas naves espaciais. A pressão da radiação solar e o vento solar aceleram os materiais afastando-os da cabeça do cometa a velocidades diferentes conforme a dimensão e a massa dos materiais. Por isso, caudas de poeira relativamente massivas são aceleradas lentamente e tendem a ser curvas. A cauda de iões é muito menos massiva, e é acelerada de tal modo que aparece como uma linha quase direita afastando-se do cometa na direcção oposta ao Sol. Cada vez que um cometa visita o Sol, perde alguns dos seus materiais voláteis. Eventualmente, torna-se noutra massa rochosa no sistema solar. Por esta razão, diz-se que os cometas têm vida curta, numa escala de tempo cosmológico. Muitos cientistas acreditam que alguns asteróides são núcleos de cometas extintos, cometas que perderam todos os seus materiais voláteis.

2.5 Movimentos dos planetas

O homem e todos os animais do planeta percebem o dia e a noite. O comportamento dos seres vivos altera-se de acordo com a presença ou ausência de luz solar, mas saber como ocorrem os dias e as noites foi uma descoberta bastante demorada. Na antiguidade, era possível encontrar os pontos cardeais, saber a ordem da distância dos planetas até a Terra, calcular quantos dias tinha o ano e prever as estações. No entanto, acreditava-se que o dia e a noite ocorriam porque o céu girava ao redor da Terra enquanto ela permanecia parada.

Se observarmos atentamente o céu, a sensação que temos é que tudo gira ao nosso redor enquanto estamos parados, por causa disso pensava-se que a Terra estava no centro do universo. Só quando o homem deixou de pensar que a Terra era o centro do universo é que se considerou a possibilidade dela girar enquanto o céu permanecia parado. Isso aconteceu no fim do século XV, quando Nicolau Copérnico verificou que os planetas não podiam ser encontrados nas posições previstas por cálculos quando a Terra era considerada o centro do Universo. Por isso ele lançou uma teoria em que o Sol estava no centro e todos os outros planetas giravam ao seu redor. Posteriormente Johannes Kepler (que viveu na mesma época de Galileu) conseguiu calcular a órbita de Marte em redor do Sol. Kepler mostrou que: a órbita em torno dos planetas é plana; a trajectória descrita tem a forma de uma elipse, localizando-se o Sol num dos focos; existe uma relação numérica entre o tempo de uma translação em torno do Sol e o raio médio da órbita do planeta. Mas, o facto da Terra girar e não o céu só foi confirmado com o aparecimento da luneta. Com ela Galileu pôde observar que outras luas giravam ao redor do planeta Júpiter e que o próprio Júpiter girava sobre si mesmo. Esses factos levaram os astrónomos a concluir que a Terra era apenas um planeta como os outros e não o centro do universo.

Com a evolução da Ciência e da Tecnologia, foi possível determinar a distância do Sol a cada planeta, assim como o tempo de uma translação e de uma rotação.

À volta do Sol, a diferentes distâncias, giram os vários planetas, entre os quais a Terra. Cada planeta, à medida que roda à volta do Sol, vai desenhando uma

curva com a forma de uma elipse, quase uma circunferência. Essa curva é chamada órbita do planeta à volta do Sol.

Assim, designa-se por período de translação o tempo que um planeta demora a completar uma volta em torno do Sol ou um satélite em torno do planeta. Período de rotação o tempo que um planeta ou satélite demora a dar uma volta completa em torno do seu eixo.

Verificou-se então que a Terra anda em volta do Sol. Como é o seu movimento? De facto, a Terra tem dois movimentos ao mesmo tempo, tal como os restantes planetas:

- Movimento de rotação.
- Movimento de translação.

A rotação consiste no movimento giratório da Terra em torno do seu *eixo*, uma linha imaginária que passa pelo centro da Terra e que atravessa a superfície desta nos chamados pólos Norte e Sul (figura 2.13). O pólo Norte é o ponto da Terra de onde se vê a estrela Polar quase por cima. O pólo Sul é o ponto oposto, do outro lado da Terra. Daí não se vê a estrela Polar. Não faz sentido dizer que o pólo Norte está por cima do pólo Sul, uma vez que as noções de "cima" e "baixo" dependem do ponto de vista: para uma pessoa no pólo Norte, o pólo Sul está para baixo, mas, para uma pessoa no pólo Sul, é o pólo Norte que está para baixo. O sentido "para baixo" dirige-se sempre para o interior da Terra!

Um plano perpendicular ao eixo de rotação da Terra e que a divide em duas metades, chamadas hemisfério Norte e hemisfério Sul, marca na superfície terrestre uma linha chamada equador (figura 2.13).

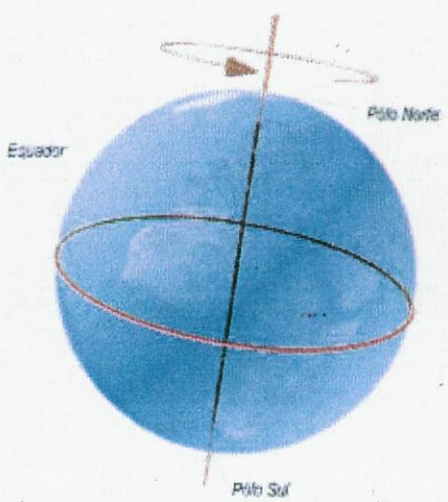


Figura 2.13 – Movimento de rotação da Terra, com o eixo da Terra, os pólos Norte e Sul e o equador. A metade de cima, na figura, é o hemisfério Norte e metade de baixo é o hemisfério Sul. Adaptada de http://nautilus.fis.uc.pt/astro/hu/movi/rotacao.html

A translação consiste no avanço do centro da Terra ao longo de uma curva fechada em redor do Sol (figura 2.14). Dizemos que descreve uma órbita (ou trajectória). Essa órbita parece circular mas, em rigor, é uma curva chamada elipse. Esse movimento dá-se com a velocidade de 30 Km/s: isto significa que, em cada segundo, a Terra anda 30Km. Durante a translação, o eixo de rotação da Terra faz um ângulo de 23º com o plano da órbita da Terra.

Podemos, pois, comparar o nosso planeta a uma bailarina, que dá voltas em torno de si própria. Mas essa bailarina não está sempre no mesmo sítio. O movimento da Terra em volta do Sol é semelhante ao de uma bailarina que, rodando sobre si mesma, anda em volta de um ponto do palco. Para complicar, não é uma bailarina vertical, mas sim um pouco inclinada.

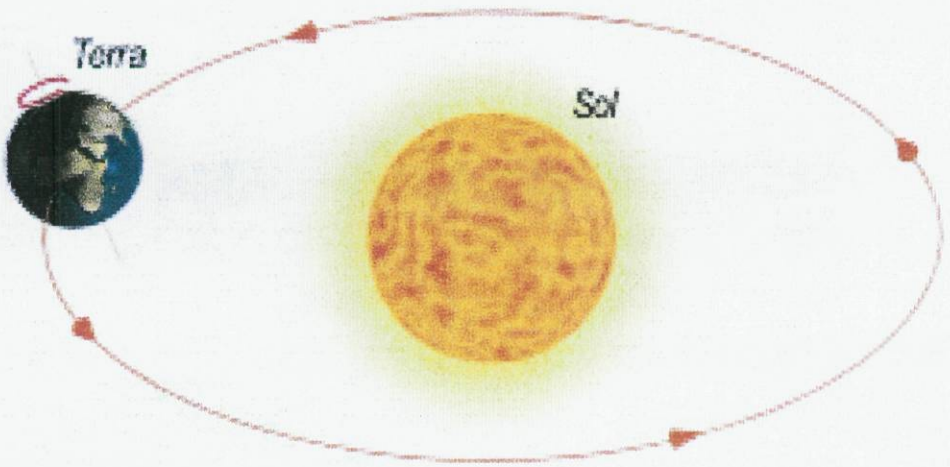


Figura 2.14 – Movimento de translação e rotação da Terra
Adaptada de "Encontro com a Física 8"" – Joaquim Morgado et al Plátano editora

Como nos apercebemos dos movimentos de translação e de rotação da Terra?

2.5.1 Rotação da Terra

O movimento de rotação da Terra explica a existência dos dias e das noites. De dia, uma parte dos habitantes da Terra recebe luz solar, porque a parte da superfície da Terra onde vivem está virada para o Sol, mas os habitantes da Terra que estão do outro lado não recebem essa luz. Por exemplo, em Lisboa, às 8 h da manhã é de dia mas, em Nova Iorque, nos Estados Unidos, para Ocidente de Lisboa, no mesmo instante são 3 h da manhã e ainda é de noite (figura 2.15). Enquanto uns tomam o pequeno almoço os outros ainda vão a

meio do seu sono... A Terra vai girando e, em certos lugares, passa a ser noite quando era dia e, noutros lugares, do outro lado da Terra, passa a ser de dia quando era noite. E isto sem nunca parar!

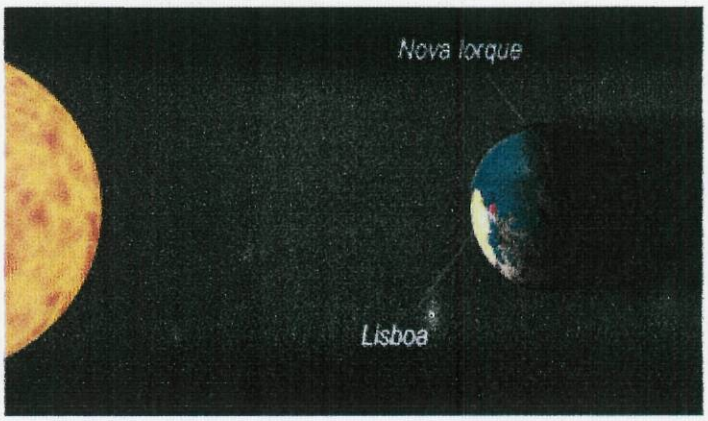


Figura 2.15 - Movimento de rotação da Terra visto de cima do pólo Norte: Lisboa e Nova Iorque não "acordam" na mesma altura...

Adaptada de http://nautilus.fis.uc.pt/astro/hu/movi/rotacao.html

Como compreender melhor os movimentos da Terra?

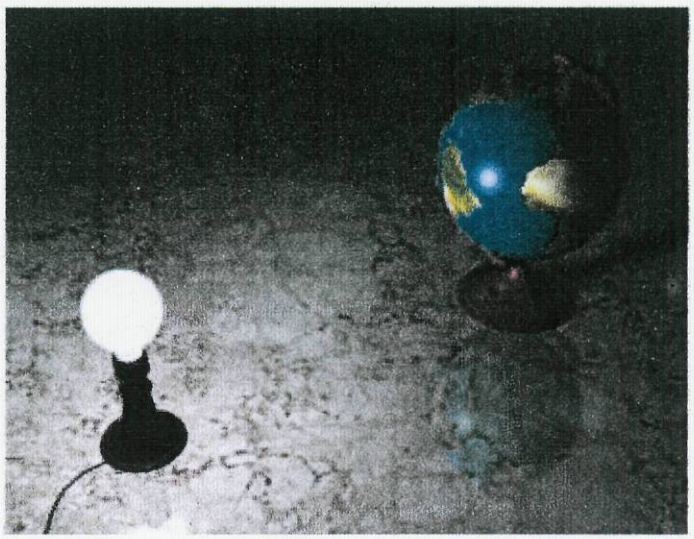


Figura 2.16 - Modelo da Terra a girar em torno do seu eixo e a andar em volta do Sol.

Adaptada de http://nautilus.fis.uc.pt/astro/hu/movi/rotacao.html

Quando começa o dia, vemos o Sol «nascer» (de facto, não nasce, apenas surge à nossa vista, aproximadamente na direcção chamada Oriente ou Este), no horizonte ou linha de separação entre a terra e o céu (figura 2.16). Durante o dia, vemos o Sol percorrer o céu, num arco que vai de Oriente (ou Este) para Ocidente (ou Oeste). Ao meio-dia solar, o Sol está o mais alto possível, «está a pino»! Quando começa a noite, dizemos que o Sol se «põe» no horizonte, isto é, desaparece da nossa vista. Contudo, os nossos sentidos enganam-nos: não é o

Sol que anda à volta da Terra (como julgavam os povos antigos), mas sim a Terra que está em rotação, virando sucessivas partes para o Sol. Vemos o Sol ir de Oriente para Ocidente porque a Terra gira no sentido contrário, de Ocidente para Oriente. O movimento do Sol é aparente.

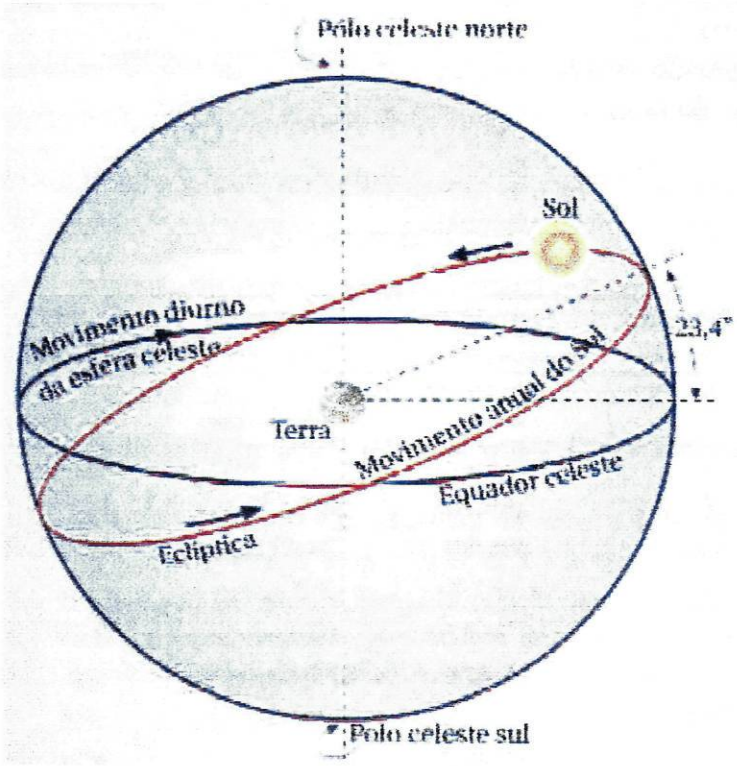


Figura 2.17- Movimento aparente do Sol. Deve-se à rotação da Terra.
Adaptada de "Encontro com a Física 8" – Joaquim Morgado –Plátano editora

Quando vamos num comboio, também nos parece que é a paisagem que vai a andar para trás, quando, de facto, é o comboio que vai a andar para a frente enquanto a paisagem permanece imóvel. O comboio desloca-se em relação à paisagem.

A Terra demora um dia, isto é, 23,9345 horas (~24h), a completar uma volta em torno de si própria. Dizemos que o período de rotação da Terra é de um dia. O vaivém espacial (nave espacial reutilizável dos Estados Unidos) em órbita em volta da Terra gira mais rapidamente do que esta, pelo que os astronautas a bordo vêem, durante 24 horas, vários nasceres e pores do Sol.

Durante um dia, vemos o Sol nascer e pôr-se uma vez. A nossa experiência indica, portanto, que, durante parte do dia (24 horas), é de dia (vê-se o Sol) e que, durante a outra parte, é de noite (não confundir o dia, intervalo de tempo de

24 horas, com o dia, intervalo de tempo em que se vê o Sol). Mas essas duas partes não são, em geral, iguais. As durações do dia e da noite dependem da data do ano: no Verão, os dias são maiores do que as noites e, no Inverno, é ao contrário (podemos verificar este facto medindo com um relógio os intervalos entre o nascer e o pôr do Sol em vários dias ao longo do ano). Mas há dois dias especiais no ano em que os dias têm a mesma duração que as noites: são os chamados equinócios, a 21 de Março e a 23 de Setembro, quando começam, respectivamente, a Primavera e o Outono. A duração dos dias e das noites depende também do lugar da Terra: nos pólos, é de dia durante seis meses e é de noite durante outros seis meses.

De noite, também nos podemos aperceber do movimento de rotação da Terra. Tal como o Sol de dia, também as outras estrelas parecem mover-se, percorrendo arcos no céu. Falamos, por isso, de movimento aparente das estrelas. A estrela Polar (também chamada *Polaris*) parece quase fixa, porque se situa praticamente no prolongamento do eixo de rotação da Terra, na direcção pólo Norte - pólo Sul. Mas a estrela Sírio (também chamada *Sirius*) move-se. No hemisfério Norte vemos durante a noite as estrelas, incluindo a Sírio, andarem em torno da Polar (figura 2.18). As aparências enganam: o céu, com as estrelas, não roda em volta de nós, por cima das nossas cabeças...

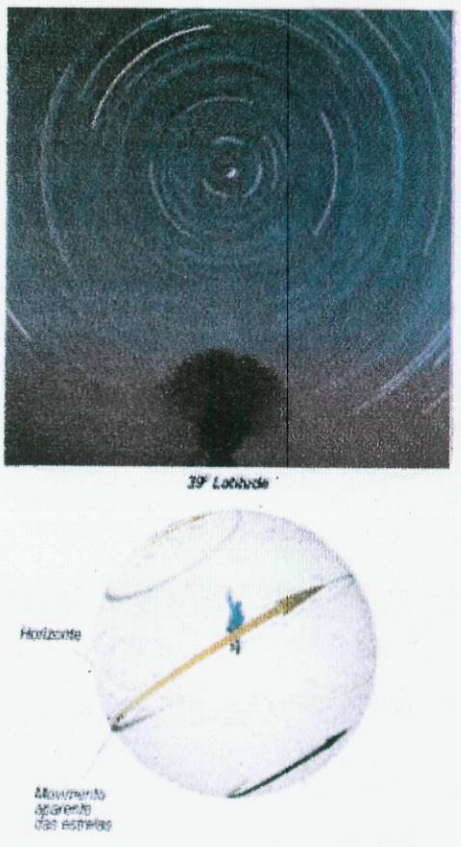


Figura 2.18 - Fotografia de longa exposição mostrando as estrelas a rodar. A estrela Polar está quase no centro e, por isso, roda muito pouco. Este movimento das estrelas é aparente e deve-se ao movimento de rotação da Terra. Adaptada de http://nautilus.fis.uc.pt/astro/hu/movi/images/imagem10.html

Em resumo: o movimento de rotação da Terra explica o movimento aparente do Sol, que vemos durante o dia, e o movimento aparente das outras estrelas, que vemos durante a noite.

2.5.2. Translação da Terra

Observando com atenção do mesmo lugar, verificamos que o Sol nem sempre nasce no mesmo sítio do horizonte e nem sempre se põe no mesmo sítio. Então onde fica a direcção do Oriente num certo lugar? De facto, o Sol só nasce exactamente a Oriente e só se põe exactamente a Ocidente nos dias 21 de Março e 23 de Setembro (os equinócios de que já falámos). Mas, qualquer que seja o dia do ano, passado um ano (cerca de 365 dias), o Sol volta a nascer no mesmo sítio.

Por outro lado, observando ao longo do ano também do mesmo lugar mas de noite, verificamos que o aspecto do céu à mesma hora da noite não é o mesmo todos os meses. Mas tudo se repete de ano a ano. Vemos o céu nocturno diferente todos os meses, porque a Terra se está a mover no espaço e "fica virada" para zonas diferentes do céu à medida que os meses passam (por exemplo, o céu visto de Portugal não é o mesmo em Janeiro e em Agosto, figura 2.19).

O tempo que a Terra demora a dar uma volta completa em volta do Sol não é exactamente de 365 dias, mas sim 365 dias e 6 horas, pelo que, de quatro em quatro anos, existe um ano com um dia a mais no calendário, sempre o último de Fevereiro. Esses anos são chamados bissextos.

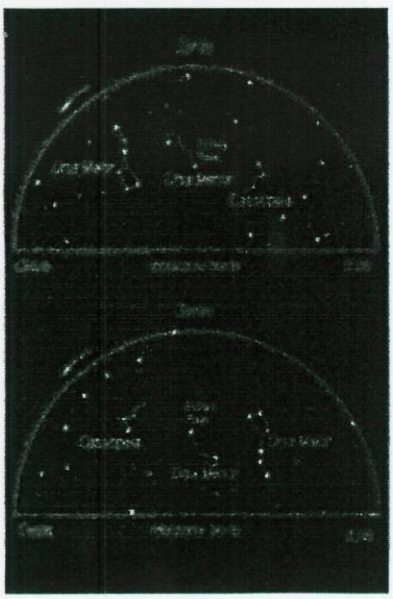


Figura 2.19 - Cartas celestes mostrando o céu de Janeiro e o céu de Agosto, vistos de Portugal. O aspecto do céu nesses dois meses é diferente em virtude do movimento de translação da Terra. Adaptada de http://nautilus.fis.uc.pt/astro/hu/movi/translacao.html

Tanto os diferentes lugares onde nasce e se põe o Sol como o diferente aspecto do céu durante os vários meses do ano são explicados pelo movimento de translação da Terra em torno do Sol.

Dizemos que o período de translação da Terra é um ano, o tempo formado por 365 dias e 6 horas. Um jovem de catorze anos já deu, portanto, 14 voltas em torno do Sol. A órbita da Terra em volta do Sol é aproximadamente circular. O raio da órbita da Terra mede 150 milhões de quilómetros:

150 000 000 km = 150 x 10^6 km = 1,5 x 10^8 km = 1,5 x 10^{11} m.

Esta distância é muito grande comparada quer com o raio do Sol (R_{Sol} = 700 000 km = 7,0 x 10^5 km = 7,0 x 10^8 m) quer com o raio da Terra (R_{Terra} = 6 400 km = 6,4 x 10^3 km = 6,4 x 10^6 m). A distância Terra-Sol é duas ordens de grandeza superior ao raio do Sol, por sua vez, o raio do Sol é duas ordens de grandeza superior ao raio da Terra.

Por outro lado, sabemos que os vários meses do ano têm um clima diferente. As quatro estações do ano (Primavera, Verão, Outono e Inverno) caracterizam-se por tempos meteorológicos bem distintos (falamos de tempo meteorológico para o distinguir do tempo dos relógios). No hemisfério Norte, a Primavera começa a 21 de Março (equinócio de Março), o Verão a 21 de Junho, o Outono a 23 de Setembro (equinócio de Setembro) e o Inverno a 21 de Dezembro, pelo que as estações dividem o ano em quatro partes aproximadamente iguais (figura 2.20).

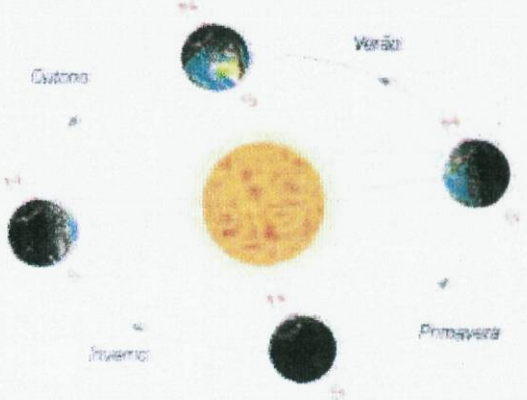


Figura 2.20 - Translação da Terra, com a indicação das quatro estações do ano.
Adaptada de http://nautilus.fis.uc.pt/astro/hu/movi/translacao.html

No Verão, está mais quente e no Inverno mais frio. Mas o Verão e o Inverno ocorrem em épocas diferentes do ano no hemisfério Norte e no hemisfério Sul. No hemisfério Norte, o Verão vai de 21 de Junho a 23 de Setembro e o Inverno de 21 de Dezembro a 21 de Março. Mas, no hemisfério Sul, o Verão vai de 21

de Dezembro a 21 de Março e o Inverno de 21 de Junho a 23 de Setembro. Tal facto explica-se também pelo movimento de translação da Terra. Contudo, o tempo quente no Verão no hemisfério Norte *não* se deve ao menor afastamento da Terra em relação ao Sol nem o tempo frio no Inverno no mesmo hemisfério se deve ao maior afastamento da Terra em relação ao Sol! A órbita terrestre é quase circular, pelo que a Terra está sempre praticamente à mesma distância do Sol. O que sucede é que o eixo de rotação da Terra está inclinado 23º em relação ao plano da órbita da Terra. Assim, no Verão do hemisfério Norte, este hemisfério está mais inclinado para o Sol (e o hemisfério Sul está menos inclinado para o Sol). No Verão, a luz do Sol incide mais frontalmente sobre o hemisfério Norte (figura 2.21).

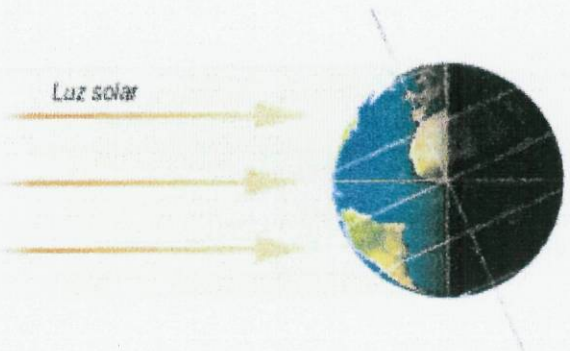


Figura 2.21 - Planeta Terra com o eixo inclinado. Inclinação dos raios solares sobre o hemisfério Norte no Verão. No Verão, há um dia de seis meses no pólo Norte. Adaptada de http://nautilus.fis.uc.pt/astro/hu/movi/translacao.html

Devido à inclinação do eixo de rotação da Terra, durante a Primavera e Verão no hemisfério Norte, é sempre dia no pólo Norte e é sempre noite no pólo Sul (figura 2.21). Do mesmo modo, durante o Outono e Inverno no hemisfério Norte, é sempre dia no pólo Sul e é sempre noite no pólo Norte. A duração dos dias e das noites varia, portanto, à medida que nos afastamos do equador, para Norte ou para Sul.

Resumindo: Os diferentes lugares onde nasce e se põe o Sol ao longo do ano, o diferente aspecto do céu nocturno, a sucessão das estações do ano e a diferente duração dos dias e das noites num certo lugar da Terra são, todos eles, explicados pelo movimento de translação da Terra.

2.6 Fases da Lua e eclipses

A Lua é o astro mais perto da Terra mas está relativamente longe, se compararmos a distância da Terra à Lua com as distâncias na Terra. Tem um tamanho muito menor do que o da Terra. A Lua está a 380 000 km da Terra e tem um raio de 1700 km, que é praticamente um quarto do raio da Terra (ver Tabela 7.1). O primeiro astronauta a caminhar na Lua, o norte-americano Neil Armstrong, fê-lo em 20 de Julho de 1969, um dia histórico para a Humanidade. Os astronautas que foram à Lua demoraram cerca de 4 dias a chegar lá. Mas a luz do Sol (corpo luminoso) reflectida na Lua (corpo iluminado) demora só cerca de um segundo a chegar à Terra. Essa luz chama-se, luar.

	Raio	Massa	Distância à Terra	Período de rotação	Período de translação
Terra	6400 km	$6,0 \times 10^{24}$ kg	0 km	24 h	1 ano
Lua	1700 km	$7,3 \times 10^{22}$ kg	384 000 km	27,3 h	27,3 h
Sol	700 000 km	$2,0 \times 10^{30}$ kg	150×10^{6} km	30 dias	$2,2 \times 10^{7}$ anos

Tabela 2.22 Dados comparativos da Lua, da Terra e do Sol.

Desde 1972 que o homem não voltou à Lua. Mas a imagem e o som dos astronautas, quando estes emitiam ondas de televisão ou de rádio da Lua para a Terra, demorava cerca de um segundo a chegar até nós. Um raio *laser* enviada da Terra a um espelho que os astronautas deixaram na Lua demora também esse tempo a ir e o mesmo tempo a voltar.

A Lua anda em volta da Terra tal como a Terra anda em volta do Sol. A Lua também possui, como a Terra, um movimento simultâneo de rotação e translação. O período de rotação da Lua é igual ao período de translação (27,3 dias) de tal maneira que vemos sempre a mesma face da Lua. A outra face é a chamada face escondida da Lua... Só os astronautas que foram à Lua viram directamente a face escondida da Lua quando se encontravam em órbita da Lua (durante esse tempo interrompiam-se as comunicações com a Terra pois as ondas de rádio não atravessavam a Lua).

A Lua apresenta diferentes aspectos ou fases quando vista da Terra (figura 2.23):

- Lua Cheia (disco cheio).

- Quarto Minguante (com a forma de um C; diz-se que a Lua "é mentirosa").
- Lua Nova (disco escuro).
- Quarto Crescente (com a forma de um D).

Cada uma dessas fases demora cerca de uma semana, de modo que o conjunto das quatro fases demora um período lunar, quase um mês (o nosso calendário está pois baseado na Astronomia). Essas fases explicam-se pela posição relativa do Sol, da Terra e da Lua. Quando esses três astros estão em linha, há Lua Cheia ou Lua Nova, conforme a Terra esteja entre o Sol e a Lua ou a Lua esteja entre o Sol e a Terra. Os Quartos Crescente e Minguante correspondem a posições intermédias respectivamente entre Lua Nova e Lua Cheia e entre Lua Cheia e Lua Nova. Num jornal diário pode encontrar-se a fase da Lua nesse dia.

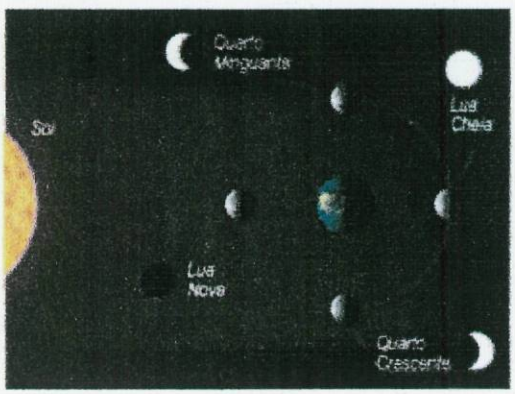


Figura 2.23 – Fases da Lua, associadas ao movimento de translação da Lua em volta da Terra.
Adaptada de http://nautilus.fis.uc.pt/astro/hu/movi/

O plano do movimento da Lua em torno da Terra não coincide com o plano do movimento da Terra em torno do Sol, no entanto há certos momentos do ano em que os referidos planos se cruzam – os nodos.

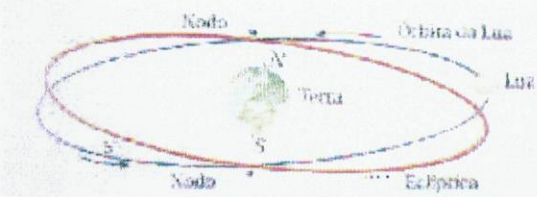


Figura 2.24 – Os planos de órbita
Adaptado de "Encontro com a Física 8"- Joaquim Morgado – Plátano editora

Quando os dois planos se cruzam e, simultaneamente, a Lua passa entre o Sol e a Terra, os três astros ficam alinhados. Nesta situação, uma porção do globo terrestre vai ficar na ausência de luz solar. Os habitantes dessa zona deixam,

momentaneamente, de ver, na totalidade ou parcialmente, o Sol; diz-se que ocorreu um eclipse do Sol. Para os terrestres que se encontram no cone de penumbra, dá-se o nome de eclipse total; para os que estão no cone de penumbra, o eclipse é parcial. Existe um eclipse do Sol quando a Lua está exactamente entre o Sol e a Terra, de modo que a luz do Sol aparece tapada em alguns lugares da Terra (figura 2.25). O eclipse total do Sol só se observa numa zona limitada da Terra e dura só alguns minutos. De dia fica então de noite... Porque é que não há sempre um eclipse todos os meses, quando há Lua Nova? Porque o plano da órbita da Lua em volta da Terra *não* é o mesmo que o plano da órbita da Terra em volta do Sol... Só há alinhamento dos três astros em certas ocasiões, nas alturas de passagem nos nodos..

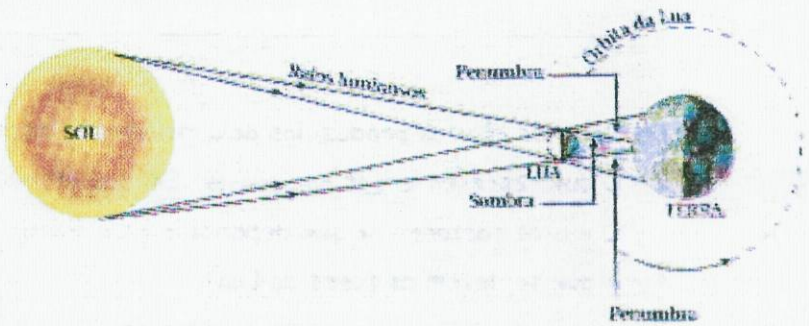


Figura 2.25 Eclipse do Sol

Adaptado de "Encontro com a Física 8"- Joaquim Morgado – Plátano editora

Por outro lado, existe um eclipse da Lua (figura 2.26) quando a Terra está exactamente entre o Sol e a Lua. A Terra projecta a sua sombra sobre a Lua, tapando-a da nossa vista (observando o bordo da sombra da Terra sobre a Lua comprovamos que a Terra tem forma esférica!). Porque é que não há um eclipse da Lua todos os meses, sempre que há Lua Cheia? A resposta é semelhante à do eclipse solar.

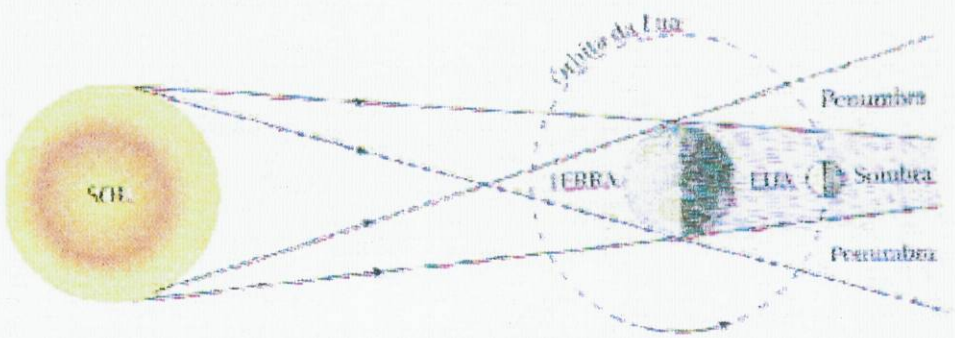


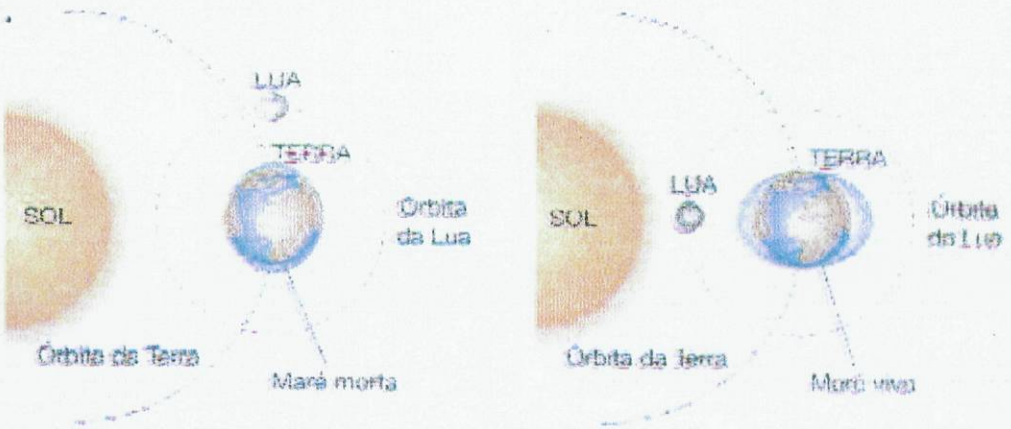
Figura 2.26 – Eclipse Lunar

Adaptado de "Encontro com a Física 8"- Joaquim Morgado – Plátano editora



Figura 2.27 – Fotografias dos eclipses totais da Lua (em cima) e do Sol (em baixo). Em cima, vêem-se cinco imagens da Lua tiradas sucessivamente. Em baixo, notar que os discos do Sol e da Lua têm praticamente o mesmo tamanho vistos da Terra.

Na Terra existe um outro fenómeno também em consequência das fases da Lua: as marés dos oceanos. Tanto a massa da Lua como a do Sol ajudam a produzir variações nas alturas das águas dos mares – são as marés. O tamanho das marés depende das posições relativas do Sol e da Lua. Porém, a Lua, porque se encontra muito mais próxima, é a principal responsável. As marés são mais altas nos mares que se encontram na face da Terra mais próxima da Lua, porque a Lua atrai as águas – é a maré alta. Quando o Sol e a Lua se encontram, ao mesmo tempo, do mesmo lado da Terra, estas marés cheias são maiores, dado que nesta situação o Sol e a Lua estão a exercer o seu efeito em conjunto – são as marés vivas.



2.7 Calendários

O que são os calendários? Os primeiros calendários eram instrumentos destinados a fornecer as indicações astronómicas ou astrológicas (dia e mês). Normalmente eram construídos com dois ou mais discos perfurados e marcados, que ao serem posicionados correctamente entre si forneciam os valores desejados. Actualmente, o calendário é um sistema de contagem de tempo relativamente longo (maior que um dia). Os calendários actuais são formados por um conjunto de regras baseadas na Astronomia e em convenções culturais. O calendário é uma escala que divide o tempo em dias, semanas, meses e anos.
Como surgiram? Os calendários surgiram com a necessidade do homem de contar o tempo e controlar as suas actividades. Surgiram inicialmente para pequenos períodos de tempo (dias e semanas) e posteriormente para programar os plantios e colheitas, determinados pelas estações. Mas a determinação precisa dos dias de início de uma estação e fim da outra só era feita por sacerdotes muito experientes, que tivessem financiamento para construir e manter os observatórios, que eram caros e precários - normalmente eram os reis que financiavam os sacerdotes, por isso, era difícil para os agricultores do país todo fazer uma determinação de início e fim das estações. A partir dessa necessidade os sacerdotes elaboraram os calendários que eram registros escritos dos dias onde eram marcadas datas de cheias, plantios e colheitas. As estações ocorriam e ocorrem de forma regular a cada 365,25 dias, que é a duração do nosso ano. Então, bastava fazer a contagem correcta dos dias e marcar os dias de início e fim das estações como temos hoje (21 de Junho início do Verão, 22/23 de Setembro início do Outono, 21/22 Dezembro início do Inverno e 21 de Março início da Primavera).

2.7.1 O nosso calendário

A duração exacta do ano é 365,242199 dias. Esse não é um número inteiro de dias, ou seja o ano dura: 365 dias + 5 horas + 48 minutos + 47 segundos, que é o tempo para que a Terra dê uma volta completa em redor do Sol. Por causa da falta de precisão nas observações os antigos arredondavam para 365 dias + 6 horas. Porém se somarmos seis horas a cada ano em quatro anos as estações

ficam defasadas um dia. Por isso existe o ano bissexto, ou seja, a cada quatro anos o ano tem 366 dias para que as estações não fiquem defasadas com o passar do tempo. Se não houvesse o ano bissexto em 360 anos o Inverno estaria começando no Outono, ou seja o início de todas as estações estaria atrasado de 90 dias. Em 720 anos o Verão estaria a começar no Inverno. A sugestão de inserir um dia a mais a cada quatro anos foi feita pelo astrónomo Sosígenes de Alexandria ao imperador Júlio César no ano 46 a.C. e por isso esse calendário passou a ser chamado de "Calendário Juliano" em homenagem ao imperador.

2.7.2. Curiosidade

O calendário actual é mais preciso que o calendário Juliano e considera o ano correctamente, ou seja, 365 dias + 5 horas + 48 minutos + 47 segundos, menor que 365 dias e 6 hora. Como só é possível contar o ano usando dias inteiros, a solução foi ajustar a contagem através da colocação ou retirada de anos bissextos (anos com 366 dias) nos anos que são múltiplos de quatro. Para entender melhor essa contagem vamos transformar o ano correcto em fracções de dias, ou seja, 365 dias + 1/4 dias - 1/100 dias + 1/400 dias - 1/3300 dias. Dessa maneira basta olhar o denominador e o sinal da fracção para saber de quantos em quantos anos o ano bissexto existe ou deixa de existir. Exemplificando, (+1/4) representa que todo ano múltiplo de 4 é ano bissexto, mas (-1/100) representa que todo ano múltiplo de 100 não é bissexto mesmo sendo múltiplo de 4 e (+1/400) representa que todo ano múltiplo de 400 é bissexto mesmo sendo múltiplo de 100. Então o ano 2000 será bissexto, porque é múltiplo de 400, mas o ano 1900 não foi e o ano 2100 também não será bissexto pois são múltiplos de 100. Assim as estações nunca ficam defasadas.

Este é o calendário mais preciso que existe, chamado de "Calendário Gregoriano" e é o calendário que usamos actualmente. Foi adoptado em 1582 pelo Papa Gregório XIII, com o objectivo de determinar correctamente a data da Páscoa. Mesmo antes de existir o telescópio as observações astronómicas já eram bastante precisas para conseguir saber a duração exacta do ano.

2.7.3. Outros Calendários

Na antiguidade a comunicação entre os povos e principalmente entre os sacerdotes de cada nação era difícil devido à demora no transporte das informações, por isso trocar informações era algo muito demorado para que os calendários fossem os mesmos. Além disso cada rei queria impor a sua autoridade e impunha o calendário que lhe era conveniente. Por essas razões muitos calendários foram criados. Os principais eram:

- *Calendário Babilónico*: o ano não tinha um numero de dias fixo. O ano era dividido em 12 meses lunares de 29 ou 30 dias cada o que somava 354 dias. Para acertar a data das estações do ano os babilónios adicionavam um 13º mês em cada três anos, assim as estações não ficavam muito defasadas com o passar do tempo, mas essa adição do 13º não era muito regular, por causa da dificuldade no transito das informações. Também faziam a divisão do mês em semanas de sete dias.

- *Calendário Egípcio*: é um calendário baseado no movimento solar. O ano tinha 365 dias, divididos em 12 meses de 30 dias que somam 360 dias e mais 5 dias de festas depois da colheita. Eles tinham conhecimento de que o ano tinha 365,25 dias, mas até serem invadidos pelos romanos no século I a.C. não faziam a correcção de adicionar um dia a mais a cada quatro anos.

- *Calendário Grego*: baseado nos movimentos solares e lunares, seguindo um padrão parecido com o calendário babilónico, porém a intercalação do 13º mês era bem mais complexa.

Os índios americanos - Maias, Astecas e Incas - também tinham calendários baseados principalmente no mês lunar.

Hoje em dia basicamente temos três calendários em vigência no mundo. Um deles é o calendário que usamos e que conta os anos a partir do nascimento de Cristo, ou seja, o ano em que Cristo nasceu foi o ano 1, os outros são os calendários muçulmano e israelita que não consideram o nascimento de Cristo e por isso apresentam anos diferentes do nosso. O calendário israelita é baseado no babilónico. Uma curiosidade é que o dia desse calendário como do muçulmano inicia-se com o por do Sol e não às 0:00h como o nosso calendário.

O primeiro dia de cada ano novo não pode cair na quarta, sexta ou domingo. Se isso acontecer o início do ano é transferido para o dia seguinte.

2.7.4. As divisões dos calendários

As unidades básicas dos calendários são os dias. Os dias normalmente são agrupados em porções maiores que formam as semanas e os meses as estações e os anos. Esses agrupamentos ocorrem para facilitar a contagem como fazemos naturalmente com os números. Os seres humanos tinham a necessidade de contar a passagem do tempo e descobriram que a própria natureza se encarregou de fornecer agrupamentos que ajudavam nessa contagem.

As semanas: Existem dois motivos que fizeram os antigos agrupar sete dias para formar uma semana, um deles é baseado nas fases da lua. Observando as fases da Lua percebe-se que entre o quarto crescente e a lua cheia passam-se sete dias. Muitos calendários são baseados na lua para formar os agrupamentos.

Outro motivo que deu origem a esse agrupamento de sete dias para formar a semana eram os astros visíveis no céu a olho nu. Na antiguidade podiam ser vistos sete astros no céu e que não eram estrelas; o Sol, a Lua, e cinco planetas: Mercúrio, Vénus, Marte, Júpiter e Saturno. Por isso muitos povos deu a cada dia da semana o nome de um desses astros. Em muitos idiomas esses nomes estão presentes até hoje, como se pode ver na tabela abaixo.

Astros	Espanhol	Italiano	Inglês	Português
Sol	Domingo	Domenica	Sunday	Domingo
Lua	Lunes	Lunedi	Monday	Segunda-feira
Marte	Martes	Martedi	Tuesday	Terça-feira
Mercúrio	Miercoles	Mercoledi	Wednesday	Quarta-feira
Júpiter	Jueves	Giovedi	Thursday	Quinta-feira
Vênus	Viernes	Venerdi	Friday	Sexta-feira
Saturno	Sabado	Sabato	Saturday	Sábado

Tabela 2.23 – Relação entre os nomes dos planetas e os dias da semana

Os meses: A sua origem em quase todos os calendários foram as fases lunares. Inicialmente os meses tinham 28 ou 29 dias, mas isso fazia com que o ano

tivesse 12,5 meses o que dificultava um agrupamento coerente. Com o passar do tempo a comunicação foi-se tornando mais fácil, a veiculação de calendários ficou mais simples e as dificuldades de dividir o ano em meses foi sendo solucionada aos poucos. Houve então a tendência de uniformizar os calendários. Assim, os meses deixaram de ter exactamente o número de dias das fases lunares para que o ano tivesse sempre 12 meses. A primeira ideia desses ajustes, no número de dias do mês, foi dos egípcios que dividiram o ano em doze meses de trinta dias cada um e mais cinco dias de festas para completar os 365 dias. O mês de Fevereiro foi o único a ser preservado para coincidir com o número de dias das quatro fases lunares.

A data da Páscoa é calculada com base num calendário lunar, que é mantido pela igreja. É por isso que a data da Páscoa não é sempre a mesma de ano para ano.

O ano: A sua origem é comum em todos os calendários é o período necessário para as estações do ano se voltarem a repetir. Essa repetição coincide com uma volta completa da Terra ao redor do Sol.

Capítulo 3 - Galáxias

3.0 Introdução

Neste capítulo efectua-se um pequeno estudo sobre as galáxias, sua morfologia e classificação.

3.1 A nossa Galáxia – Via Láctea

Uma galáxia é um grupo enorme de milhões ou biliões de estrelas, gás e pó mantido junto pela força da gravidade.

O nosso Sol e grande parte das estrelas visíveis no céu pertencem à Via Láctea (ou Estrada de Santiago). Numa noite em que o céu esteja limpo, pode-se observar uma nuvem de luz atravessando o céu. Os antigos chamaram-lhe Via Láctea, pelo seu aspecto de leite espalhado pelo céu. A Via Láctea contém mais de 200 biliões de estrelas, muito afastadas umas das outras. Em média, as estrelas mais próximas entre si encontram-se a 5 anos-luz[4].

Se nos pudéssemos colocar numa posição afastada no espaço e olhássemos para a nossa própria Galáxia, veríamos uma espiral brilhante de diâmetro 100 000 anos – luz (30 Kpc) e a nossa Terra a viajar em redor do Sol, que se localiza num dos braços da espiral.

A Galáxia tem três partes principais: um núcleo ou bojo (na região mais central), um disco e um halo. Se olharmos para a Via Láctea de lado, deve parecer um disco fino e achatado com um centro. O diâmetro da zona central é de 10 000 a.l. (3 Kpc) e a espessura do disco de 3 000 a.l. (1 Kpc). O nosso Sol está afastado do centro cerca de 30 000 a.l. (9 Kpc).

O nosso Sol está numa posição desfavorável para a observação da estrutura Galáctica, pois faz parte dela. Os astrónomos ópticos, que estudam os braços espirais para reconstruir a estrutura da Galáxia, deparam-se com poeira interestelar. Já os rádio astrónomos podem observar para além da poeira (devido ao maior comprimento das ondas rádio comparado ao das ondas no óptico) e

[4] Em Astronomia usam-se unidades de distância próprias (ano-luz, unidade astronómica e parsec), no capítulo 7 encontra-se um breve estudo das mesmas.

portanto podem detectar a emissão das nuvens de gás que marcam os braços espirais da Via Láctea.

O disco galáctico pode ser visto a olho nu numa noite estrelada como uma banda de luz difusa que divide o céu em dois. Quando olhamos na direcção perpendicular ao disco galáctico vemos poucas estrelas, mas quando se olha na direcção do disco vê-se tantas estrelas que a luz destas chega-se a fundir formando uma banda de luz brilhante.

A Via Láctea está a rodar no espaço. Este facto foi deduzido através do efeito doppler da radiação emitida pelos braços em espiral. O nosso Sol e o restante Sistema Solar, estão a rodar em torno do centro da Galáxia a cerca de 250 Km/s. Mesmo com este valor incrível de velocidade, o Sistema Solar necessita de 220 milhões de anos para completar uma revolução.

3.2 O tamanho e forma da Galáxia usando contagens de objectos – W. Herschel

No final do século XVIII, muito antes dos métodos de medidas de distâncias terem sido desenvolvidos, o astrónomo inglês W. Herschel tentou estimar o tamanho e a forma da nossa Galáxia simplesmente contando quantas estrelas podia ver em diferentes direcções no céu. Supondo que todas as estrelas tinham o mesmo brilho, ele concluiu que a Galáxia era achatada, em forma de disco e que o Sol ocupava o seu centro.

Hoje sabemos que a Galáxia tem uma extensão de várias dezenas de kiloparsecs e o Sol não está no seu centro. Como puderam as primeiras observações estarem tão erradas? Devido ao facto dos astrónomos, até 1930, não saberem dos efeitos que a absorção interestelar da luz (devido à poeira) poderiam causar nas observações ópticas. Hoje sabemos que o Sol está num local onde há obscurecimento em quase todas as linhas de visão. Por este motivo Herschel viu contagens uniformes ao longo do disco e pensou que o Sol estava no centro dele.

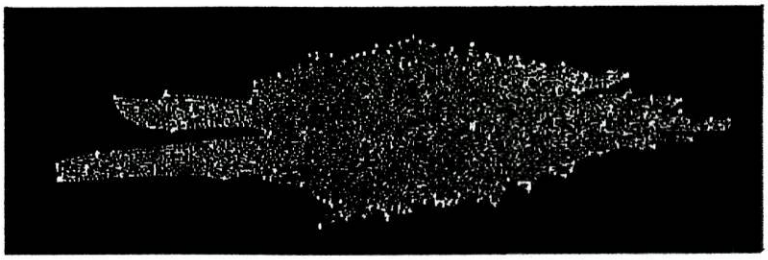


Figura 3.1 - A Via Láctea, como proposta por Herschell.
Adaptada de http://www.iagusp.usp.br/~jane/aga215/aula01/inicio.htm

A compreensão da forma real da nossa Galáxia e a conclusão de que existem muitas galáxias iguais à nossa no Universo só surgiram quando indicadores de distâncias como Cefeidas e RR Lyraes foram descobertos.

3.3 A descoberta das galáxias

Por volta do século XVIII vários astrónomos já tinham observado, entre as estrelas, a presença de corpos extensos e difusos, os quais denominaram por nebulosas. Hoje sabemos que diferentes tipos de objectos estavam agrupados sob esse termo, a maioria pertencendo à nossa própria Galáxia: nuvens de gás iluminadas por estrelas dentro delas, cascas de gás ejectadas por estrelas em estágio final de evolução estelar, aglomerados de estrelas. Mas alguns deles - as nebulosas espirais - eram galáxias individuais, como a nossa Via Láctea.

Immanuel Kant (1724-1804), o grande filósofo alemão, influenciado pelo astrónomo Thomas Wright (1711-1786), foi o primeiro a propor, por volta de 1755, que algumas nebulosas poderiam ser sistemas estelares totalmente comparáveis à nossa Galáxia. Citando Kant: ``[A] analogia [das nebulosas] com o sistema estelar em que vivemos... está em perfeita concordância com o conceito de que esses objectos elípticos são simplesmente universos [ilha], em outras palavras, Vias Lácteas...". Essa ideia ficou conhecia como a ``hipótese dos universos - ilha". No entanto, as especulações cosmológicas de Kant não foram bem aceites na época, de forma que a natureza das nebulosas permaneceu assunto de controvérsia.

Até 1908, cerca de 15 mil nebulosas tinham sido catalogadas e descritas. Algumas correctamente identificadas como aglomerados estelares, e outras como nebulosas gasosas. A maioria, porém, permanecia de natureza inexplicada. O maior problema era que a distância a elas não era conhecida, portanto não era possível saber se elas pertenciam ou não à nossa Galáxia.

Dois dos maiores protagonistas nessa controvérsia foram Harlow Shapley (1885-1972), do Mount Wilson Observatory, e Heber Doust Curtis (1872-1942), do Lick Observatory, ambos dos Estados Unidos. Shapley defendia que as nebulosas espirais eram objectos da nossa Galáxia, e Curtis defendia a ideia oposta, de que eram objectos extra galácticos. A discussão culminou num famoso debate em Abril de 1920, frente à Academia Nacional de Ciências. Mas o debate não resolveu a questão.

Somente em 1923 **Edwin Powell Hubble** (1889-1953) proporcionou a evidência definitiva para considerar as "nebulosas espirais" como galáxias independentes, ao identificar uma variável Cefeide na "nebulosa" de Andrómeda (M31).

A partir da relação conhecida entre período e luminosidade das Cefeides[5] em geral, e do brilho aparente das Cefeides de Andrómeda, Hubble pôde calcular a distância entre esta e a Via Láctea, obtendo um valor de 600 mil de anos-luz. Isso situava Andrómeda para lá dos limites da nossa Galáxia, que tem 100 mil anos-luz de diâmetro. Ficou assim provado que Andrómeda era um sistema estelar independente.

3.4 Classificação morfológica de galáxias

As galáxias diferem bastante entre si, mas a grande maioria tem formas mais ou menos regulares quando observadas em projecção contra o céu, e enquadram-se em duas classes gerais: espirais e elípticas. Algumas galáxias não têm forma definida, e são chamadas irregulares.

Um dos primeiros e mais simples esquemas de classificação de galáxias, que é usado até hoje, foi inventado por Hubble nos anos 20. No que respeita à morfologia, as galáxias podem classificar-se em: regulares e irregulares. As galáxias regulares por sua vez: elípticas, espirais e espirais barradas. As galáxias irregulares, sem estrutura definida: tipo I (se estão resolvidas em estrelas, regiões HII, etc.); tipo II (se não estão resolvidas, por exemplo as galáxias explosivas).

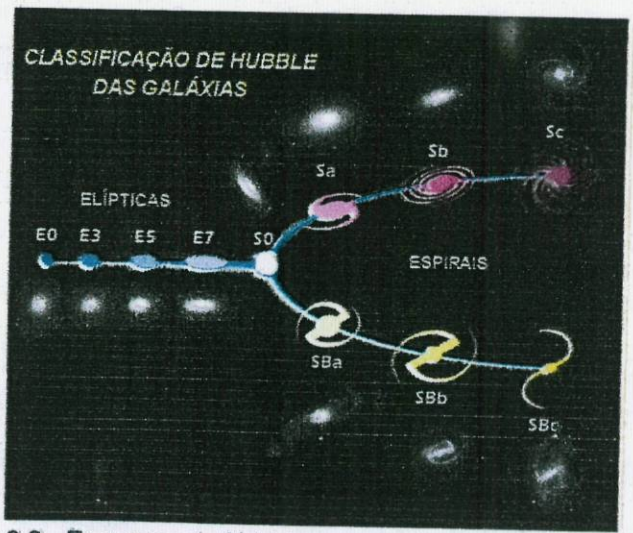


Figura 3.2 - Esquema de Hubble para a classificação de galáxias
Retirada de http://www.iagusp.usp.br/~jatenco/aga215/cap16/cap16.htm

[5] Cefeides são estrelas variáveis periódicas, em que há uma relação entre o período e a luminosidade. Para mais informações consultar "Introdution to Stellar astrophysics" Erika Böhm-Vitense

3.4.1 Galáxias Espirais (S)

As galáxias espirais, quando vistas de frente, apresentam uma clara estrutura espiral. M31 e a nossa própria Galáxia são espirais típicas. Elas possuem um núcleo, um disco, um halo, e braços espirais. As galáxias espirais apresentam diferenças entre si principalmente quanto ao tamanho do núcleo e ao grau de desenvolvimento dos braços espirais. Assim, elas são subdivididas nas categorias *Sa, Sb* e *Sc*, de acordo com o grau de desenvolvimento e enrolamento dos braços espirais e com o tamanho do núcleo comparado com o do disco

a	núcleo maior, braços pequenos e bem enrolados
b	núcleo e braços intermediários
c	núcleo menor, braços grandes e mais abertos

Por exemplo, uma galáxia Sa é uma espiral com núcleo grande e braços espirais pequenos, bem enrolados, de difícil resolução.



Figura 3.3 – Fotos de galáxias espirais obtidas por Jim Wray, do McDonald Observatory.

Existem algumas galáxias que têm núcleo, disco e halo, mas não têm traços de estrutura espiral. Hubble classificou essas galáxias como *S0*, e às vezes são chamadas *lenticulares*. As galáxias espirais e lenticulares juntas formam o conjunto das galáxias *discoidais*.

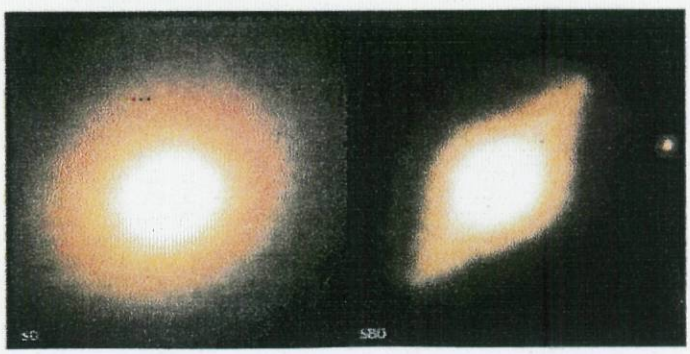


Figura 3.4 – Fotos de galáxias (SO e SOB) obtidas por Jim Wray, do McDonald Observatory

Mais ou menos metade de todas as galáxias discoidais apresentam uma estrutura em forma de barra atravessando o núcleo. São chamadas *barradas* e, na classificação de Hubble são identificadas pelas iniciais *SB*. As galáxias barradas também se subdividem nas categorias *SB0, SBa, SBb, e SBc*. Nas espirais barradas, os braços normalmente partem das extremidades da barra. O fenómeno de formação da barra ainda não é bem compreendido, mas acredita-se que a barra seja a resposta do sistema a um tipo de perturbação gravitacional periódica (como uma galáxia companheira), ou simplesmente a consequência de uma assimetria na distribuição de massa no disco da galáxia. Alguns astrónomos também acreditam que a barra seja pelo menos em parte responsável pela formação da estrutura espiral, assim como por outros fenómenos evolutivos em galáxias.



Figura 3.5 – Fotos de galáxias obtidas por Jim Wray, do McDonald Observatory

Normalmente observa-se, nos braços das galáxias espirais material interestelar. Ali também estão presentes as nebulosas gasosas, poeira, e estrelas jovens, incluindo as super - gigantes luminosas. Os aglomerados estelares abertos podem ser vistos nos braços das espirais mais próximas e os aglomerados globulares no halo. A população estelar típica das galáxias espirais é formada por estrelas jovens e velhas.

As galáxias espirais têm diâmetros que variam de 20 mil anos-luz até mais de 100 mil anos-luz. Estima-se que as suas massas variam de 10 biliões a 10 triliões de vezes a massa do Sol. A nossa Galáxia e M31 são ambas espirais grandes e massivas.

3.4.2 Galáxias Elípticas (E)

As galáxias elípticas apresentam forma esférica ou elipsoidal, e não têm estrutura espiral. Têm pouco gás, pouca poeira e poucas estrelas jovens. Elas parecem o núcleo e halo das galáxias espirais.

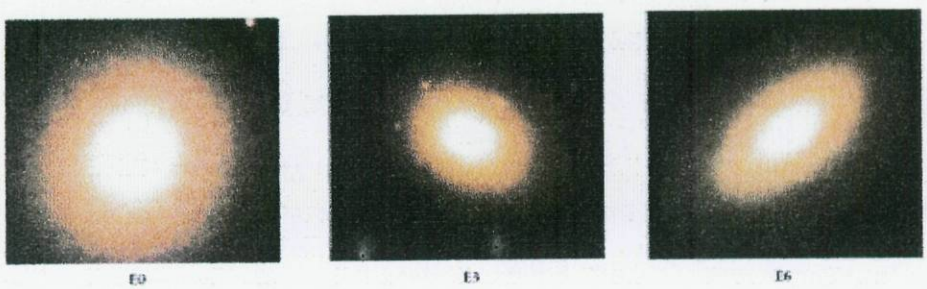


Figura 3.6 – Fotos de galáxias obtidas por Jim Wray, do McDonald Observatory

As galáxias elípticas são chamadas de **En**, onde **n=10(a-b)/a**, sendo **a** o semi-eixo maior e **b** o semi-eixo menor.

Hubble subdividiu as elípticas em classes de **E0** a **E7**, de acordo com grau de achatamento. Supondo que se está a olhar um prato circular de frente: essa é a aparência de uma galáxia E0. Agora se se inclinar o prato de forma a que ele pareça cada vez mais elíptico e menos circular: esse achatamento gradativo representa a sequência de E0 a E7. Note-se que Hubble baseou a sua classificação na aparência da galáxia, não na sua verdadeira forma. Por exemplo, uma galáxia E0 tanto pode ser uma elíptica realmente esférica quanto pode ser uma elíptica mais achatada vista de frente, já uma E7 tem que ser uma elíptica achatada vista de perfil. Porém nenhuma elíptica jamais vai aparecer tão achatada quanto uma espiral vista de perfil.

As galáxias elípticas variam muito de tamanho, desde super - gigantes até anãs. As maiores elípticas têm diâmetros de milhões de anos-luz, ao passo que as menores têm somente poucos milhares de anos-luz de diâmetro. As elípticas gigantes, que têm massas até 10 triliões de massas solares, são raras, mas as elípticas anãs são o tipo mais comum de galáxias.

3.4.3 Galáxias Irregulares (I)

Hubble classificou como galáxias irregulares aquelas que eram privadas de qualquer simetria circular ou rotacional, apresentando uma estrutura caótica ou irregular. Muitas irregulares parecem sofrer actividade de formação estelar relativamente intensa, a sua aparência é dominada por estrelas jovens brilhantes e nuvens de gás ionizado distribuídas irregularmente. Em contraste, observações no comprimento de onda dos 21 cm, que revela a distribuição do gás hidrogénio, mostra a existência de um disco de gás similar ao das galáxias espirais. As galáxias irregulares também lembram as espirais no seu conteúdo estelar, que inclui estrelas de população I e II (jovens e velhas).

Os dois exemplos mais conhecidos de galáxias irregulares são a Grande e a Pequena Nuvens de Magalhães, as galáxias vizinhas mais próximas da Via Láctea, visíveis a olho nu no Hemisfério Sul, identificadas pelo navegador português Fernão de Magalhães (1480-1521), em 1520. A Grande Nuvem tem uma barra, embora não tenha braços espirais. Aparentemente orbita a Via Láctea. Nela está presente o complexo 30 Doradus, um dos maiores e mais luminosos agrupamentos de gás e estrelas super-gigantes conhecido em qualquer galáxia. A Supernova 1987A ocorreu perto de 30 Doradus.

A Pequena Nuvem é bastante alongada e menos massiva do que a Grande Nuvem. Aparentemente é o resultado de uma colisão com a Grande Nuvem acontecida há uns 200 milhões de anos atrás.

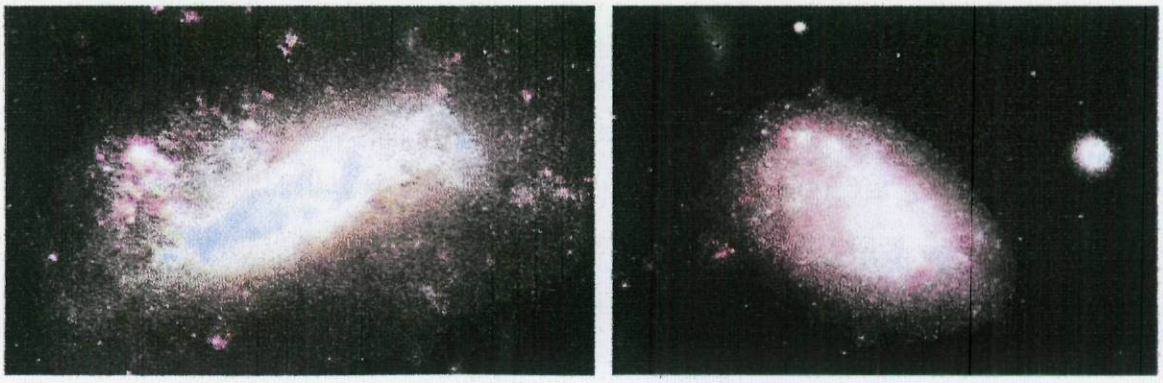


Figura 3.7 Foto das galáxias irregulares Grande Nuvem de Magalhães e Pequena Nuvem de Magalhães, obtidas no Anglo-Australian Observatory.

Principais características dos diferentes tipos de galáxias

Propriedade	**Espirais**	**Elípticas**	**Irregulares**
Massa ($M_\odot$)	10^9 a 10^{12}	10^6 a 10^{13}	10^6 a 10^{10}
Diâmetro (10^3 parsecs)	5 - 30	1 - 1000	1 - 10
Luminosidade ($L_\odot$)	10^8 a 10^{11}	10^6 a 10^{12}	10^6 a 2×10^9
População estelar	Velha e jovem	Velha	Velha e jovem
Tipo espectral	A	G	A
Gás	Bastante	Muito pouco	Bastante
Poeira	Bastante	Pouca	Varia
Cor	Azulada no disco	Amarelada	Azulada
	Amarelada no bojo		
Estrelas mais velhas	10^{10} anos	10^{10} anos	10^{10} anos
Estrelas mais jovens	Recentes	10^{10} anos	Recentes

3.5 Massas das galáxias

Assim como a massa de uma estrela é a sua característica física mais importante, também nas galáxias a massa tem um papel crucial, não apenas na sua evolução como sistemas individuais, mas na evolução do próprio universo. Por exemplo, da quantidade de massa das galáxias depende a densidade do universo, que determina se o universo se vai expandir para sempre ou se um dia se irá contrair.

Observacionalmente, a massa é determinada a partir das velocidades das estrelas e do gás interestelar.

3.5.1 Massas de galáxias elípticas

A massa de uma galáxia elíptica pode ser determinada a partir do *Teorema do Virial*, segundo o qual num sistema estacionário (cujas propriedades não variam no tempo), a soma da energia potencial gravitacional das partículas e o dobro da

sua energia cinética, é nula, ou seja: $E_G + 2E_C = 0$, onde E_G é a energia potencial gravitacional e E_C é a energia cinética.

Podemos considerar uma galáxia como um sistema estacionário (pois ela não se está nem a contrair nem a expandir), cujas partículas são as estrelas.

A energia cinética das estrelas na galáxia pode ser escrita como $E_C = \frac{Mv^2}{2}$, onde M é a massa total da galáxia e v é a velocidade média das estrelas, medida pelo alargamento das linhas espectrais. O alargamento espectral acontece porque, como as estrelas estão em movimento aleatório, algumas produzirão um deslocamento das linhas espectrais para o azul e outras para o vermelho. Esses dois deslocamentos, juntos, resultam num alargamento das linhas.

A energia potencial gravitacional é $E_G = -\frac{GM^2}{2R}$ onde R é um raio médio da galáxia que pode ser estimado a partir da distribuição de luz. Combinando as três equações obtém-se que $M_{elípticas} = \frac{2v^2 R}{G}$.

Este mesmo método pode ser usado também para calcular as massas de aglomerados de galáxias, assumindo que eles são estacionários. Nesse caso, consideraremos cada galáxia como uma partícula do sistema. A energia cinética pode ser calculada pelos deslocamentos das linhas espectrais, e a energia potencial gravitacional pela separação média das galáxias do aglomerado.

3.5.2 Massas de galáxias espirais

Em galáxias espirais, nas quais o movimento circular das estrelas no disco é dominante sobre o movimento desordenado das estrelas do bojo, a massa pode ser determinada através da *curva de rotação*, v(R), que é um gráfico da velocidade de rotação em função da distância ao centro da galáxia. As velocidades de rotação em cada ponto são obtidas medindo o deslocamento Doppler das linhas espectrais.

Assumindo que a maior parte da massa da galáxia está no bojo interno, e que portanto o movimento rotacional das estrelas no disco é determinado pela massa do bojo, podemos determinar essa massa através da terceira lei de Kepler, da

mesma maneira como determinamos a massa da nossa Galáxia. Chamando $M(R)$ à massa interna ao raio R, temos que $M(R)_{espirais} = \frac{R[v(R)]^2}{G}$

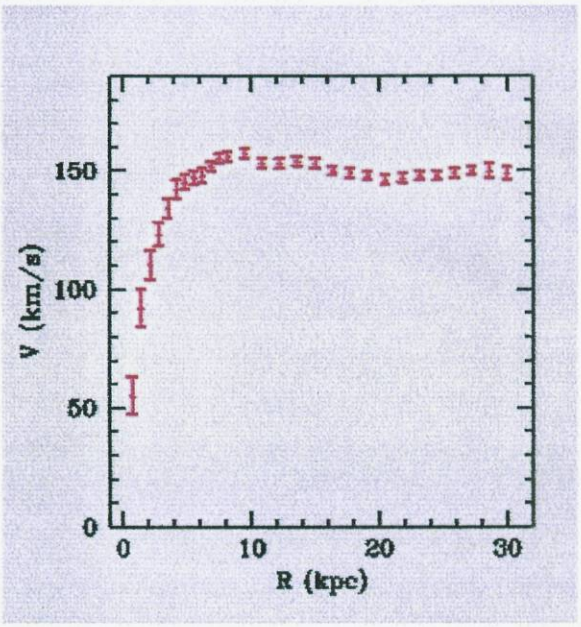


Figura 3.8 - Curva de rotação para a galáxia espiral NGC3198.
Retirada de http://pcastro7.if.ufrgs.br/galax/

Nas partes externas de muitas galáxias espirais $v(R)$ não depende de R, ou seja, $v(R)$ permanece constante, de forma que quanto maior o raio R, maior a massa $M(R)$ interna a ele. A partir de um certo valor de R a luminosidade não aumenta mais, mas de acordo com a curva de rotação a massa continua a crescer. Isso significa que uma grande parte da massa das galáxias deve ser não luminosa, e é conhecido como o *problema da massa escura*.

3.6 A formação e evolução das galáxias

Qual a causa de existirem diferentes tipos de galáxia? Quando os primeiros estudos sobre galáxias se iniciaram, o facto de as galáxia elípticas terem estrelas em geral mais velhas do que as galáxias espirais levou os astrónomos a pensarem que as diferenças se deviam à evolução, ou seja, as galáxias quando jovens seriam espirais e mais tarde evoluiriam para elípticas.

Entretanto, se determinarmos as idades das estrelas mais velhas em sistemas espirais e em sistemas elípticos, encontramos que em ambos os tipos essas estrelas são igualmente velhas, em torno de 10 biliões de anos. Portanto, todas as galáxias que vemos começaram a formar-se mais ou menos na mesma época

da história do universo, e portanto têm mais ou menos a mesma idade. A diferença é que nas espirais e nas irregulares sobrou gás suficiente para continuar o processo de formação estelar até a época presente.

Uma diferença importante entre elípticas e espirais é a velocidade com que ocorre a formação estelar. Parece que nas elípticas a formação estelar aconteceu de forma mais rápida no início da sua evolução, talvez porque se tenham originado de nuvens proto galácticas mais densas do que as espirais. Da mesma forma, nas regiões centrais das espirais, onde a densidade era maior, a formação estelar foi rápida, mas nos braços ocorreu mais lentamente, de forma que o gás não foi todo consumido de uma vez, e a formação estelar pode continuar.

Outro factor importante é a quantidade de momento angular (quantidade de rotação) da nuvem de gás primordial: quanto mais momento angular a nuvem possuía inicialmente, mais achatada será a forma final. Levando isso em conta, as elípticas formaram-se de nuvens que tinham pouca rotação quando se começaram a contrair, ao passo que as espirais se teriam formado do colapso de nuvens com mais rotação.

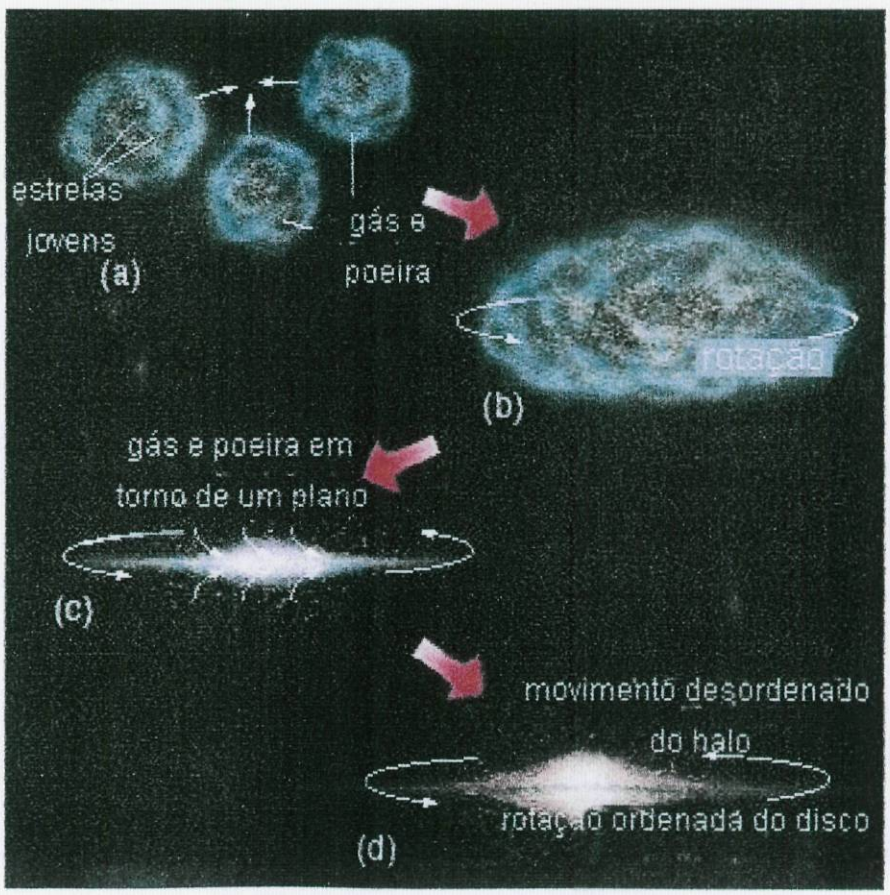


Figura 3.9 – Formação de galáxias
Retirada de http://www.iagusp.usp.br/~jatenco/aga215/cap15/cap15.htm

3.7 Aglomerados de galáxias

Olhando fotografias do céu, nota-se facilmente que as galáxias tendem a existir em grupos. Jan Hendrik Oort (1900-1992) demonstrou que as galáxias não estão distribuídas aleatoriamente no espaço, mas concentram-se em grupos, como o Grupo Local, que contém 30 galáxias, e grandes enxame, como o grande enxame de Virgem, que contém 2500 galáxias. Oort demonstrou também que as 2 500 galáxias do enxame de Virgem, movendo-se a 750 km/s, são insuficientes por um factor de 100 para manter o enxame gravitacionalmente estável, indicando novamente que a matéria escura deve ser dominante. Recentemente a detecção pela emissão de raios x do gás quente no meio entre as galáxias dos enxames indica que um terço da matéria originalmente chamada de escura é na verdade gás quente. Mas pelo menos dois terços da matéria escura não pode ser bariônica, ou a quantidade de hélio e deutério do Universo teria que ser diferente da observada.

3.7.1 O Grupo Local

O grupo de galáxias ao qual a Via Láctea pertence chama-se **Grupo Local**. É um aglomerado pequeno com cerca de 30 membros, dos quais a Via Láctea e Andrómeda são os mais massivos. As Nuvens de Magalhães, galáxias satélites da nossa Galáxia, também fazem parte desse grupo. Os outros membros são, na maioria, galáxias elípticas, e algumas são bem fracas. O Grupo Local ocupa um volume de 3 milhões de anos-luz na sua dimensão maior, tendo a nossa Galáxia e Andrómeda localizadas uma em cada extremidade.

3.7.2 Outros aglomerados de galáxias

Outros aglomerados de galáxias variam de grupos pequenos a aglomerados compactos. O aglomerado de *Fomax*, relativamente próximo, apresenta um conjunto variado de tipos de galáxias, embora tenha poucos membros. O grande aglomerado de *Coma* cobre 20 milhões de anos-luz no espaço e contém milhares de membros. O aglomerado de *Virgem* tem no centro as galáxias elípticas gigantes M84 e M86, situadas a uma distância de 34 milhões de anos-luz. Ele também cobre 10 milhões de anos-luz no espaço e é um dos mais espectaculares do céu. As suas quatro galáxias mais brilhantes são galáxias

elípticas gigantes, embora a maior parte das galáxias membros visíveis sejam espirais. O aglomerado de Virgem é tão massivo e tão próximo que influencia gravitacionalmente o Grupo Local, fazendo com que nos movamos na sua direcção. A galáxia elíptica gigante M87, também do aglomerado, contém um buraco-negro massivo no seu centro, com massa de $1{,}3\times10^{9} M_{\odot}$.

A denominação M das galáxias vem de Charles **M**essier (1730-1817), um descobridor de cometas, que em 1781 registrou a posição de 103 objectos extensos (nebulosas) para não confundi-los com cometas.

3.7.3 Superaglomerados

Depois de descobrir que as galáxias faziam partes de aglomerados ou enxames de galáxias, os astrónomos investigaram se existiam estruturas ainda maiores no Universo. Em 1953, o astrónomo francês Gérard de Vaucouleurs (1918-1995) demonstrou que os aglomerados de galáxias também formam super - aglomerados.

O super- aglomerado mais bem estudado é o Super Enxame Local, porque fazemos parte dele. Ele tem um diâmetro de aproximadamente 100 milhões de anos-luz e aproximadamente uma massa de cerca de 10^{15} massas solares, contendo o Grupo Local de galáxias, e o enxame de Virgem.

Entre estes super- aglomerados observam-se grandes regiões sem galáxias, mas onde foram detectadas nuvens de hidrogénio neutro. Margaret J. Geller (1947-) e John Peter Huchra (1948-), do *Center for Astrophysics* da Universidade de Harvard, e os brasileiros Luiz Alberto Nicolaci da Costa (1950-) e Paulo Sergio de Souza Pellegrini (1949-), do Observatório Nacional Brasileiro, têm estudado a distribuição de galáxias em grande escala, mostrando que as galáxias não estão distribuídas uniformemente, mas formam filamentos no espaço. Um exemplo destes filamentos é a Grande Parede (*Great Wall*), uma concentração de galáxias que se estende por cerca de 500 milhões de anos-luz de comprimento, 200 milhões de anos-luz de altura, mas somente 15 milhões de anos-luz de espessura. Esta estrutura está a uma distância média de 250 milhões de anos-luz da nossa Galáxia, e tem uma massa da ordem de $2\times10^{16} M_{\odot}$. Entre estes filamentos estão regiões, de diâmetros de 150 milhões de anos-luz, sem galáxias. A estrutura lembra um esponja.

3.8 Quasares e galáxias activas

O Sol irradia muito mais energia que qualquer corpo terrestre. Uma estrela ao explodir como supernova pode liberar muito mais energia do que o Sol em toda a sua vida. No entanto, mesmo as emissões devido à explosão de supernovas não são comparáveis às de um quasar ou de uma galáxia activa. Alguns quasares emitem mais energia num segundo do que o Sol emite em 200 anos.

3.8.1 Um pouco de história

O desenvolvimento da rádio astronomia no final dos anos 40 abriu uma nova era. O primeiro telescópio rádio foi construído em 1936 por Grote Reber no quintal da sua casa em Illinois. Em 1944 Reber detectou fortes emissões de rádio vindas da constelação de Sagitarius, Cassiopeia e Cygnus. Duas destas fontes, chamadas de Sagitarius A e Cassiopeia A pertencem à nossa Galáxia. A primeira é o núcleo galáctico e a segunda uma remanescente de supernova. No entanto, para a terceira fonte descoberta por Reber, chamada de Cygnus A, não foi fácil descobrir a sua natureza. O mistério só foi desvendado quando em 1951, Walter Baad e Rudolph Minkowski, usando o telescópio Palomar descobriram uma galáxia peculiar na mesma posição das observações de rádio.

A galáxia associada com a fonte de rádio Cygnus A é muito pouco luminosa. Ainda sim, Baade e Minhowski conseguiram obter o seu espectro e determinaram um redshift correspondente a uma velocidade de 17000 km/s. De acordo com a lei de Hubble, esta velocidade indica que Cygnus A está a 750 milhões de anos-luz da Terra.

A distância enorme de Cygnus A surpreendeu os astrónomos porque esta é uma das fontes de rádio mais brilhante no céu. Embora seja quase não visível através do telescópio de Palomar, a emissão de rádio de Cygnus A pode ser medida pelo equipamento de um astrónomo amador. A sua energia, deve ser portanto enorme. De facto, a sua luminosidade no rádio é 7 ordens de magnitude maior que a da galáxia de Andrómeda, mesmo sendo muito mais distante do que esta. O objecto que corresponde a Cygnus A tem que ser um objecto extraordinário para ter tais características.

3.8.2 Quasares

Cygnus A (Cyg A) não é a única fonte com forte emissão de rádio a grandes distâncias. Já em 1950 os rádio astrónomos se ocupavam de fazer longas listas de fontes de rádio. Uma das listas mais famosas, entitulada "O Terceiro Catálogo de Cambridge" foi publicado em 1959. Cyg A, por exemplo, está na lista de Cambridge. Devido à extraordinária luminosidade rádio de Cyg A, os astrónomos estavam muito interessados na época em descobrir se algum outro objecto da lista tinha semelhantes propriedades a Cyg A.

Um caso interessante nesta lista era 3C 48. Em 1960 o astrónomo Allan Sandage usou o telescópio de Palomar para descobrir uma "estrela" na posição desta fonte de rádio. Devido ao facto de estrelas normais não serem emissoras em rádio, este facto pareceu muito estranho à comunidade científica. Quando um espectro foi obtido, nenhuma das riscas espectrais deste objecto puderam ser identificadas. Muitos pensaram na época que 3C48 era simplesmente uma estrela estranha da nossa Galáxia.

Outra "estrela" chamada 3C273 foi descoberta em 1962. Foi descoberto que esta tinha uma cauda de gás para um lado. A exemplo de 3C48 esta nova "estrela" também emitia uma série de riscas espectrais que ninguém podia identificar.

Uma grande descoberta foi finalmente feita em 1963, quando o astrónomo Maarten Schmidt descobriu que quatro das riscas espectrais mais brilhantes de 3C273 estavam posicionadas relativamente umas às outras da mesma maneira que as riscas de hidrogénio. No entanto, estas riscas de emissão de 3C273 eram encontradas em comprimentos de ondas muito mais longos que usualmente. Em outras palavras, descobriu-se que 3C273 tinha um enorme redshift e portanto não podia ser uma estrela da Galáxia.

Espectros de estrelas da nossa Galáxia exibem pequenos desvios Doppler porque estas estrelas não se podem estar a mover muito rapidamente ou elas já teriam escapado da nossa Galáxia. O que Schmidt descobriu é que 3C273 tinha um redshift que corresponde a 15% da velocidade da luz. De acordo com a lei de Hubble a distância até este objecto é de 2 biliões de anos-luz. 3C273 tem várias riscas de emissão. Quando obtemos o espectro de um objecto com um espectógrafo e produzimos um gráfico de comprimento de onda versus intensidade, se aparecem picos dizemos que são riscas de emissão e se aparecem vales, são riscas de absorção. Para as riscas espectrais de 3C273,

todas as riscas são mais brilhantes que a radiação de fundo chamada de contínuo. As riscas de emissão são causadas pelos átomos excitados emitindo radiação em comprimentos de ondas específicos. A emissão muito forte em algumas destas riscas sugere que o aquecimento do gás é feito por um processo diferente do conhecido até então.

Inspirados pelo sucesso de Schmidt na descoberta da natureza e redshift de 3C273 outros astrónomos estudaram 3C48 em detalhe e descobriram que este objecto também está muito distante (pois tem um terço da velocidade da luz).

Devido à aparência estelar destes dois objectos e a emissão muito forte no rádio eles foram chamados de "fontes de rádio quase estelares" ou quasares ou QSO's. Todos os quasares parecem estrelas mas emitem uma energia enorme. Não precisam necessariamente de ser fontes de rádio. Na verdade, a grande maioria deles não emite no rádio. Mesmo assim são todos denominados de quasares. Uma enorme quantidade destes objectos foram descobertos desde os anos 60. Quase todos têm redshifts enormes, em alguns casos correspondendo a 90% da velocidade da luz. Quando observamos estes quasares, estamos a medir objectos que existiram quando o universo era muito jovem.

3.8.2.1 Quasares emitem muita energia num pequeno volume.

As galáxias são grandes e brilhantes. Uma galáxia gigante típica, como a nossa Via Láctea, contém vários milhões de estrelas e uma luminosidade correspondente a 200 a 400 mil milhões de sóis. Galáxias elípticas são 10 vezes mais brilhantes que isto mas ainda assim, se colocadas às distâncias de um quasar típico, elas nunca poderiam ser vistas. O facto dos quasares serem vistos a distâncias enormes significa que eles são muito mais luminosos do que as galáxias normais. Hoje sabemos que um quasar típico é 100 vezes mais brilhante do que a nossa Via Láctea.

O estudo de quasares nos anos 60 levou à descoberta de que muitos deles apresentam flutuações na luminosidade. Um exemplo é 3C279 que sofreu um aumento na sua luminosidade por um factor 25 durante alguns anos. Estas flutuações na luminosidade possibilitaram aos astrónomos determinar os tamanhos máximos dos quasares. Sabemos que um objecto não pode variar em brilho mais rapidamente que o tempo que a luz leva para atravessá-lo. Por exemplo, um objecto que tem 1 ano-luz de diâmetro não pode variar em brilho com um período menor que um ano.

O brilho de vários quasares varia em intervalos de alguns meses, semanas, dias ou mesmo horas. Observações recentes em raios-X revelam grandes variações que ocorrem em períodos de três horas. Esta variação rapidíssima mostra que a fonte da energia do quasar deve ser muito pequena. A região emissora de um quasar típico (que emite a luminosidade de 100 galáxias) tem um diâmetro de apenas um dia-luz. Se os quasares realmente estão a distâncias enormes (como indicado pelos seus redshifts), algo deve produzir esta luminosidade de 100 galáxias num volume correspondente ao tamanho do sistema solar!

3.8.3 Galáxias Activas

Desde a descoberta de quasares foram descobertos também muitos objectos com luminosidade entre os quasares distantes e galáxias típicas. Estes objectos são as galáxias activas. Elas têm um núcleo brilhante de forma estelar, com muitas linhas de emissão. Algumas delas são altamente variáveis. Algumas galáxias tem caudas que emanam do centro e a grande maioria destes objectos são mais brilhantes que galáxias comuns. Algumas destas galáxias são classificadas como peculiares, devido a sua forma diferente de todas as classificações de Hubble.

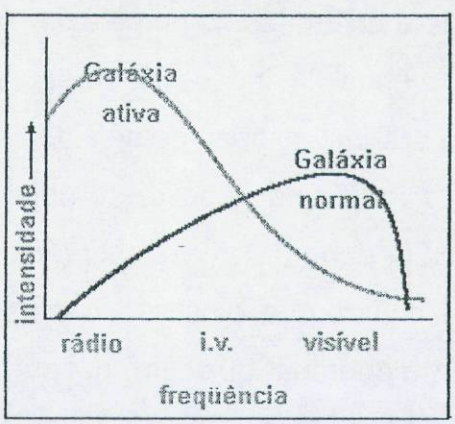


Figura 3.10 - Comparação entre as intensidades de radiação emitidas por uma galáxia normal e uma activa.
Retirada de http://www.iagusp.usp.br/~jatenco/aga215/cap15/cap15.htm

Carl Seyfert foi o primeiro a descobrir galáxias activas, quando estava a estudar galáxias espirais. Uma sub-classe grande de galáxias activas é desde então chamada de galáxias Seyfert. Aproximadamente 10% das galáxias brilhantes no céu são galáxias Seyfert. Algumas das galáxias Seyfert são tão brilhantes quanto os quasares menos luminosos e têm características muito similares às destes.

Por isso muitos astrónomos acham que galáxias Seyfert são na verdade quasares de baixa luminosidade.

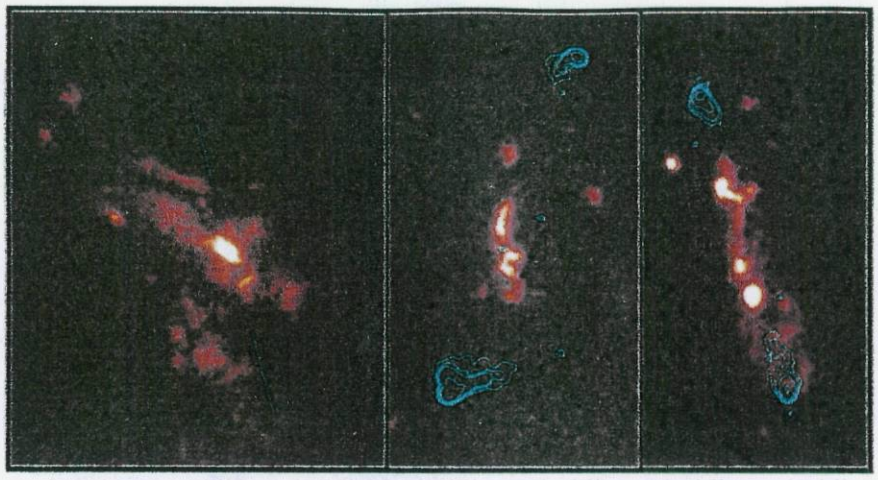


Figura 3.11 - Radiogaláxias, onde são mostrados os lóbulos de emissão de energia no comprimento de onda de rádio (*NASA*).

Algumas galáxias Seyfert apresentam evidências de que sofreram colisões recentes. Um exemplo é a galáxia NGC1275, onde são vistos dois núcleos centrais e uma ejecção de matéria ao meio inter galáctico.

A ejecção de matéria a altas velocidades é comum em galáxias activas. Isto pode ser observado melhor em comprimentos de ondas que não os do visível.

Outro tipo de galáxia activa (muito menos comum que as Seyferts) são os objectos chamados "BL Lac", chamados assim devido ao primeiro encontrado nesta classe (BL Lacertae, na constelação de Lacerta). BL Lac foi descoberta em 1929, quando acharam que era uma estrela variável comum. Este objecto apresenta flutuações de brilho de até 15 vezes em apenas alguns meses. A característica mais interessante dos objectos BL Lac é a completa falta de linhas no seu espectro, não apresentando nem emissão nem absorção.

Em poucas palavras podemos definir os objectos BL Lac's como sendo galáxias elípticas com um centro com aparência estelar e muito brilhante enquanto que as galáxias Seyferts são galáxias espirais com um centro com aparência estelar e muito brilhante.

3.8.3.1 Galáxias activas vivem no centro de fontes de rádio.

A galáxia N5128 (Centaurus A), uma das fontes de rádio mais fortes no céu está relativamente próxima (13 milhões de anos-luz). A energia em rádio desta galáxia vem de duas regiões de cada lado da galáxia chamadas de "lóbulos de

rádio". Os astrónomos acham que partículas e energia são ejectadas no núcleo da galáxia em direcção aos lóbulos.

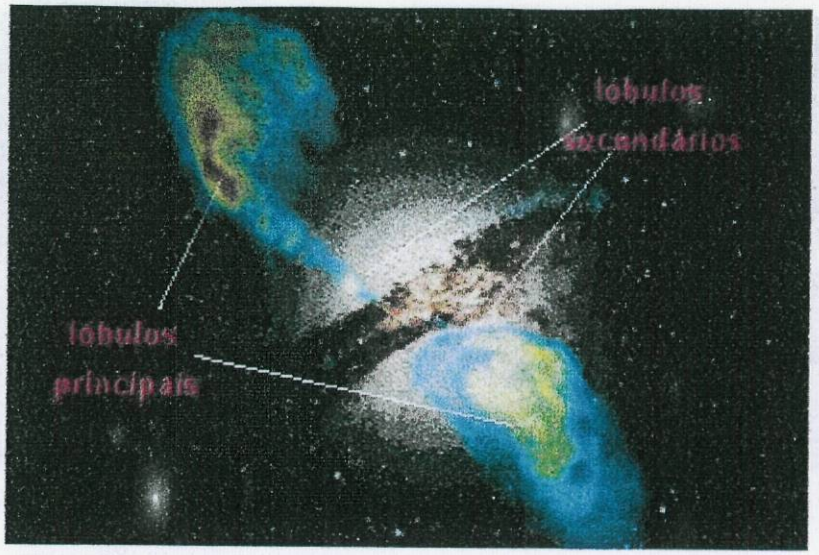


Figura 3.12 – Centaurus A, uma radiogaláxia (*J. Burns*).

Nos anos 70 os astrónomos já tinham encontrado dezenas de objectos como Centaurus A; estes actualmente são designados de "fontes de rádio com lóbulo duplo". Uma galáxia activa, usualmente parecida com uma galáxia elíptica, é frequentemente encontrada entre dois lóbulos de rádio. Por exemplo, a galáxia visível associada com Cyg A está também localizada entre dois lóbulos de rádio. Todas as fontes de rádio com lóbulo duplo devem ter um "motor" que ejecta os electrões e campos magnéticos para fora em duas direcções completamente opostas a uma velocidade próxima à velocidade da luz. Depois de viajar por muitos milhares ou milhões de anos-luz, este material ejectado desacelera, fazendo com que os electrões e campo magnético produzam a radiação que então detectamos. Um tipo específico de radiação chamada de radiação sincotrão ocorre quando electrões energéticos se movem em movimentos espirais num campo magnético. As ondas de rádio que vêm dos lóbulos da fonte de rádio dupla tem características da radiação sincotrão. Dentro do comprimento de onda de rádio as fontes de lóbulo duplo formam uma classe de objectos dos mais brilhantes do universo.

3.8.4 Buracos Negros Super-Massivos

Como é que os quasares e as galáxias activas produzem estas enormes quantidades de energia num volume tão pequeno? No final dos anos 60 o

astrónomo Lynden-Bell sugeriu que buracos negros podem ser o motor que proporciona a energia necessária.

Detectar buracos negros não é uma tarefa simples. O máximo que se pode fazer é detectar-se o efeito que este provoca e provar que não há outra explicação para o que é observado que não a hipótese de se ter um buraco negro. Esta técnica já foi usada para várias galáxias incluindo M31, M32, M104 e nossa Via Láctea.

A galáxia de Andrómeda é a maior e mais brilhante do nosso Grupo Local. A uma distância de apenas 2,2 milhões de anos-luz da Terra, M31 é próxima o bastante para que detalhes de seu centro pudessem ser estudados com o telescópio espacial Hubble. Estas observações revelaram que esta galáxia tem duas regiões brilhantes no seu centro. A menos brilhante é provavelmente o centro propriamente dito enquanto que a outra concentração pode ser um aglomerado de estrelas.

Em meados dos anos 80 vários astrónomos fizeram observações espectroscópicas do centro de M31. Usando medidas do efeito Doppler, eles determinaram que as estrelas dentro de 50 anos-luz do núcleo da galáxia estavam orbitando o núcleo com velocidades excepcionalmente rápidas, o que sugere que um objecto massivo esteja localizado no centro da galáxia. Sem a gravidade deste objecto para manter as estrelas nestas órbitas de alta velocidade, estas já teriam escapado do centro da galáxia. A partir destas observações os astrónomos estimaram que a massa do objecto central em M31 deve ter 50 milhões de massas solares. Esta grande quantidade de massa, confinada a um volume muito pequeno, sugere a existência de um buraco negro super-massivo no centro da galáxia.

Localizada nas proximidades de M31 está a pequena galáxia elíptica chamada de M32. Observações espectroscópicas de alta resolução mostram que as estrelas no centro de M32 também se estão movendo com velocidades altíssimas, que podem ser explicadas se acreditarmos que existe um buraco negro no seu centro. Imagens recentes do telescópio de Hubble mostram uma concentração de estrelas, enorme no centro de M32. A densidade de estrelas nesta região é mais de 100 milhões de vezes maior que a densidade de estrelas na vizinhança do Sol. Esta observação é mais uma evidência de que existe um buraco negro no centro de M32.

Outras observações recentes mostraram que galáxias como M104, NGC3151 e M87 também têm buracos negros em seus centros.

A luz de objectos distantes, como quasares, pode ser desviada por grandes concentrações de massa no seu caminho até nós. Esta distorção, formada devido às "lentes gravitacionais", pode criar várias imagens de uma galáxia, ou quasares distantes. Se o objecto distante estiver exactamente atrás do objecto que agirá como lente gravitacional, a luz do objecto distante chegará até nós como um anel, chamado de anel de Einstein.

Comparação entre diferentes tipos de galáxias activas

Propriedade	Radiogaláxias	Galáxias Seyfert	Objectos BL Lac	Quasares
Espectro contínuo	não-estelar	não-estelar	não-estelar	não-estelar
Linhas de emissão	largas e estreitas	largas e estreitas	nenhuma ou fracas	largas e estreitas
Linhas de absorção	sim	não	não (?)	sim
Forma no óptico	elíptica	espiral	incerta	estelar
Forma em rádio	jactos e lóbulos	emissão fraca	fraca	jactos e lóbulos

As maiores dúvidas sobre as galáxias concentram-se sobre como elas se formaram, qual é a composição da sua massa escura - que pode corresponder a 90% da sua massa total, e porque é que algumas galáxias parecem ter um buraco negro central que liberta uma quantidade colossal de energia.

Capítulo 4 - O Universo como um todo

4.0 Introdução

Neste capítulo apresenta-se uma breve discussão de vários factores relacionados com a origem do Universo e qual o seu futuro. A teoria apresentada e seguida para a origem do Universo é a do Big Bang.

4.1 Um pouco de história

Desde sempre o Homem se questionou sobre como se iniciou o mundo e como terminará. Mitos antigos, filosofia e a teologia forneceram modelos. Desde certas tradições primitivas, às religiões, que se acredita que o Universo tivesse sido criado num passado recente (um bispo do século dezassete indicava a data de 4004 a.C. como a data da criação do Universo). Aristóteles, filósofo grego, acreditava simplesmente que o Universo não tivera um início, afinal o eterno era mais perfeito do que algo que teria de ser criado. A maioria das correntes anteriores à segunda década do século XX especulavam um Universo estático, imutável com o tempo. Só com descobertas dos geólogos (determinação da idade da Terra), da segunda lei da termodinâmica por Boltzmann (a entropia aumenta com o tempo) e da lei da gravitação universal de Newton (como poderia o Universo ser estático, perante as forças atractivas das estrelas?), que começaram a haver indicadores que talvez a teoria estática do Universo pudesse estar errada. Nem mesmo Einstein acreditou no que as suas equações lhe diziam (o Universo estava em expansão), e tratou de adicionar uma constante às suas equações para defender a teoria estática do Universo.

A Cosmologia é o estudo das origens, da estrutura presente, evolução e destino do Universo. Os modelos cosmológicos diferem dos modelos iniciais pois não atribuem a origem a uma causa sobrenatural, mas procuram explicá-la através de leis da natureza e matemáticas.

Os astrónomos constróem modelos cosmológicos, descrições matemáticas e procuram explicar como se formou o Universo, como se alterou com o decorrer do tempo e o que lhe vai acontecer no futuro. Estes modelos têm de ser consistentes com os dados observacionais que se obtêm das estrelas e das galáxias.

Basicamente dois tipos de modelos: evolucionários e estáticos, foram testados nos últimos 50 anos. Os resultados apontam para o modelo evolucionário.

Doppler aplicou a sua descoberta à luz das estrelas. Observando a luz de estrelas que se afastavam da Terra, pode constatar que o seu espectro era deslocado para grandes comprimentos de onda (para o vermelho), do mesmo modo que a luz de estrelas que se estivessem a aproximar da Terra teriam comprimentos de onda mais curtos (deslocamento para o azul). Foi o início duma revolução na Cosmologia.

A observação básica que é mais importante para qualquer modelo cosmológico é que o espectro da luz das galáxias distantes sofre do fenómeno redshift , que é o desvio no seu comprimento de onda para o vermelho. Este fenómeno é conhecido como redshit cosmológico.

A teoria moderna diz que o redshift é o efeito doppler, indicando que as galáxias se estão a afastar de nós. As galáxias mais distantes observadas apresentam maior redshift.

A descoberta da expansão do Universo mudou completamente a discussão acerca da origem.

4.2 As maiores estruturas do Universo

O Universo apresenta estruturas em todas as escalas: partículas subatómicas formam núcleos, que formam átomos, que formam planetas e estrelas. Estas formam aglomerados de estrelas e galáxias, que por sua vez formam aglomerados de galáxias, super-aglomerados e estruturas ainda maiores, vazios, filamentos e muralhas de galáxias. Dos protões num átomo até às galáxias da Grande Muralha podemos traçar uma hierarquia de aglomeração da matéria das escalas menores até às maiores. A pergunta que surge é então: a aglomeração tem um final? Há uma escala a partir da qual o Universo é mais homogéneo e sem estruturas? Apesar do descrito a resposta é sim, existe.

Sabemos que amostras grandes de galáxias, para as quais os "redshifts" foram determinados, revelaram estruturas de tamanhos até 200 Mpc. Embora estas cubram uma área enorme no céu e um grande volume, estes estudos ainda são relativamente locais, no sentido de que não chegam até grandes distâncias.

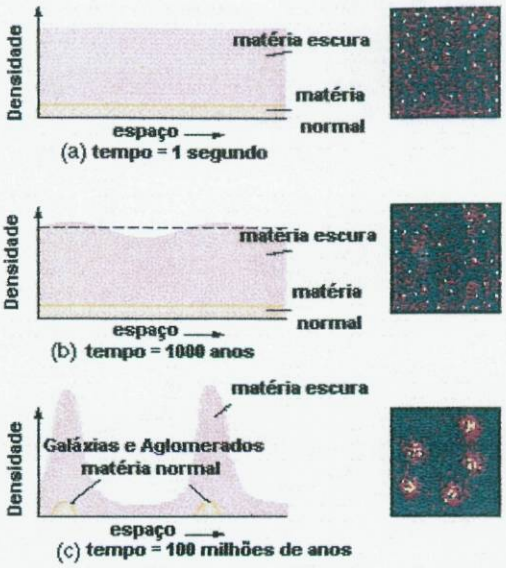


Figura 4.1 - Formação da estrutura do Universo.

Retirado de http://www.iagusp.usp.br/~jatenco/aga215/cap16/cap16.htm

Uma outra alternativa é estudar um campo pequeno, mas obter "redshifts" de galáxias a maiores distâncias. Este tipo de estudo é chamado de "pencil-beam" e estende-se até galáxias a grandes distâncias (aproximadamente 2000 Mpc). Este tipo de estudo mostra que as galáxias parecem distribuir-se em estruturas que têm no máximo de 100 a 200 Mpc de diâmetro, com "voids" entre elas. Os dados sugerem que as estruturas do Universo tem no máximo este tamanho.

Baseados nesta observação os astrónomos concluíram que o Universo deve ser homogéneo para escalas maiores que 200 Mpc. Isto quer dizer que se tomarmos um cubo de 300 Mpc, por exemplo, e o colocamos num lugar qualquer do Universo, encontraremos cerca de 100 mil galáxias (não incluindo as galáxias anãs), um número parecido com o que encontraríamos, se o cubo fosse colocado em qualquer outro lugar do Universo.

4.3 Princípio Cosmológico

A homogeneidade do Universo é a primeira das duas grandes suposições que o cosmologista (o astrónomo que estuda o Universo em grande escala e a dinâmica do Universo como um todo) faz quando estuda o Universo. Observações sugerem que esta suposição pode ser verdadeira, mas não está provada. Outra suposição feita, suportada por evidências observacionais e suporte teórico é que o Universo é isotrópico, ou seja, ele parece igual em qualquer direcção que se olhe. Há várias evidências observacionais que provam

que a hipótese de isotropia é correcta. Excepto as regiões obscurecidas da nossa Galáxia, o Universo parece realmente similar em todas as direcções, em qualquer comprimento de onda, se olharmos à distância. Em outras palavras, qualquer amostra "pencil-beam" no céu vai revelar aproximadamente o mesmo número de galáxias em qualquer área do céu para que se olhar.

As suposições de que o Universo é homogéneo e isotrópico formam a fundamentação da Cosmologia Moderna, denominadas conjuntamente de "Princípio Cosmológico".

Ninguém sabe se o princípio cosmológico é realmente correcto. Tudo que podemos dizer é que até agora ele é consistente com as observações. O Princípio Cosmológico tem implicações importantes. Por exemplo, ele implica que o Universo não tem uma extremidade, pois isto faria com que a suposição de homogeneidade fosse violada. Também implica que não existe um centro ou a suposição de que o Universo é igual em todas as direcções (isotropia) não seria correcta. Logo, este simples princípio limita a geometria geral do Universo.

4.4 Expansão Cósmica

4.4.1 O Paradoxo de Olbers

Sempre que olhamos para o céu à noite e verificamos que o céu é escuro, estamos a fazer uma observação cosmológica profunda.

De acordo com o Princípio Cosmológico, o Universo é homogéneo e isotrópico. Suponhamos, por um momento, que este seja também infinito na sua extensão espacial e que não mude com o tempo - exactamente a visão que se tinha do Universo na primeira parte do século 20. O Universo seria então, em média, uniformemente povoado com galáxias repletas de estrelas. Neste caso, quando olhamos à noite, a nossa vista tem que eventualmente encontrar uma estrela. A estrela poderia estar a uma distância enorme, numa galáxia muito distante, mas as leis da probabilidade ditam que, mais cedo ou mais tarde, qualquer linha de visão cruzaria a superfície de uma estrela.

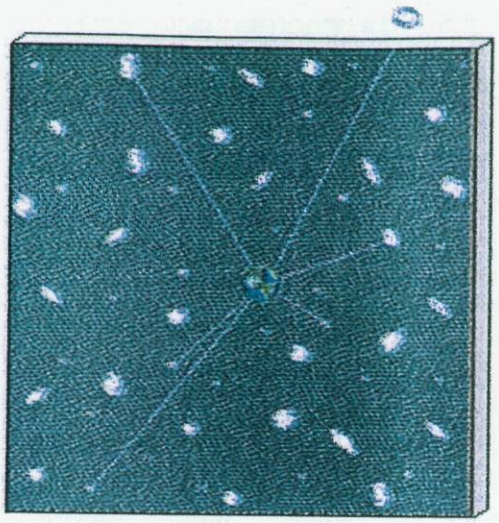


Figura 4.2 – Qualquer linha de visão cruzaria a superfície de uma estrela

Retirado de http://www.iagusp.usp.br/~jatenco/aga215/cap16/cap16.htm

Este facto teria uma implicação dramática: não importa para onde se olha, o céu deveria parecer tão brilhante como a superfície de uma estrela, o céu deveria ser tão brilhante como o Sol! A diferença óbvia entre esta predição e a realidade é o que foi chamado de Paradoxo de Olbers, em honra ao astrónomo alemão do final do século 19, Heinrich Olbers, que popularizou esta ideia.

Qual a resolução deste paradoxo? Por que é o céu escuro à noite? Tendo aceite o Princípio Cosmológico, acreditamos que o Universo seja homogéneo e isotrópico. Temos que concluir, então, que uma ou as duas outras suposições sejam erróneas. Ou o Universo é finito, em extensão e/ou evolui com o tempo. A resolução do paradoxo está intimamente ligada ao comportamento do Universo em grandes escalas.

Algumas propostas de solução:

- ✓ A poeira interestelar absorve a luz das estrelas.

  Foi a solução proposta por Olbers, mas tem um problema. Com o passar do tempo, à medida que fosse absorvendo radiação, a poeira entraria em equilíbrio térmico com as estrelas, e passaria a brilhar tanto quanto elas. Não ajuda na solução.

- ✓ A expansão do universo degrada a energia, de forma que a luz de objectos muito distantes chega muito desviada para o vermelho e portanto muito fraca. O desvio para o vermelho ajuda na solução, pois o desvio é proporcional ao raio do Universo, mas os cálculos mostram

que a degradação da energia pela expansão do universo não é suficiente para resolver o paradoxo.

- ✓ O universo não existiu por todo o sempre. Essa é a solução actualmente aceite para o paradoxo. Como o universo tem uma idade finita, e a luz tem uma velocidade finita, a luz das estrelas mais distantes ainda não teve tempo de chegar até nós. Portanto, o universo que enxergamos é limitado no espaço, por ser finito no tempo. A escuridão da noite é uma prova de que o universo teve um início.

Usando-se a separação média entre as estrelas de 1 parsec, obtém-se que o céu seria tão luminoso quanto a superfície do Sol se o Universo tivessé um raio de $2x10^{15}$pc, equivalente a 6,6 $\times 10^{15}$ anos-luz. Como o Universo só tem 13 bilhões de anos, a idade finita do Universo é a principal explicação ao Paradoxo de Olbers.

4.4.2 A Lei de Hubble e o Big Bang

Em 1923, Edwin Powell Hubble (1889-1953) , usando o recém instalado telescópio de 2,5 m de diâmetro do Monte Wilson, na Califórnia, resolveu as estrelas individuais na galáxia de Andrómeda, demonstrando que a nossa galáxia não é a única no Universo. Em 1929 Hubble, ao observar o deslocamento para o vermelho nas linhas espectrais das galáxias observadas por Milton La Salle Humason (1891-1972), e ao medir as suas distâncias, descobriu que as galáxias se estavam a afastar com velocidades proporcionais à sua distância, isto é, *quanto mais distante a galáxia, maior sua velocidade de afastamento*. Hubble publicou os seus resultados para 24 galáxias em 1929, no Proceedings of the National Academy of Science, e dois anos mais tarde, junto com Humason, estendeu os seus resultados por um factor de 18 em distância. Isso constituiu *a primeira evidência para a expansão do Universo*, já predita pelo russo Alexander *Friedmann* (1888-1925) em dois artigos publicados no *Zeitschrift für Physik* em 1922 e 1924, e pelo belga Georges-Henri Édouard *Lemaître* (1894-1966) em 1927, no *Annales de la Societè Scientifique de Bruxelles*.

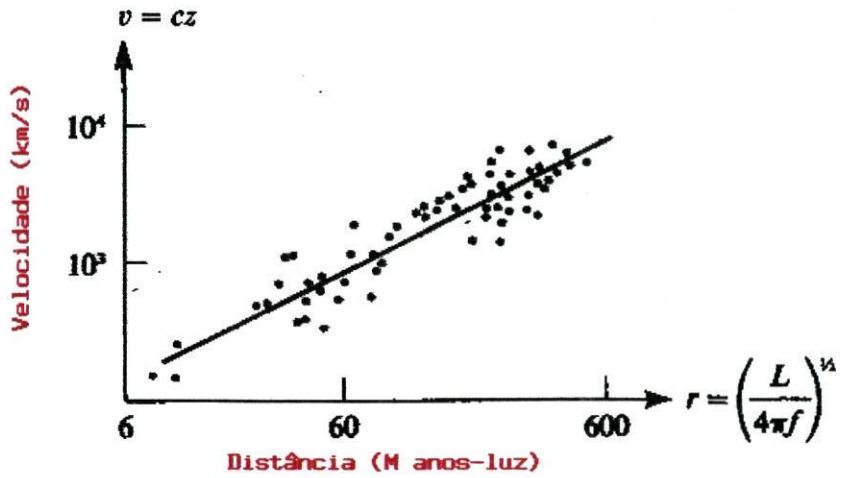


Figura 4.3 – Gráfico das velocidades de recessão de algumas galáxias.

Retirado de http://www.iagusp.usp.br/~jatenco/aga215/cap16/cap16.htm

Hubble fez uma estimativa da velocidade de afastamento por unidade de distância, hoje denominada de constante de Hubble *H*.

Todas as galáxias no Universo estão a afastar-se de nós num movimento descrito pela lei de Hubble. Esta relação tem uma importância muito maior do que simplesmente a de determinação de distâncias para objectos como galáxias e quasares.

Suponhamos que as velocidades de recessão das galáxias se mantiveram constantes desde o "Big Bang". Quanto tempo levaria para que qualquer galáxia chegasse à distância onde está hoje?

A distância segue a lei de Hubble

$$v = Hd\,,$$

$$v = \frac{d}{T_0} \rightarrow T_0 = H^{-1}$$

.

Logo o tempo é simplesmente $1/H_O$. Actualmente o valor da constante de Hubble, *H*, está entre 57 km/s/Mpc e 78 km/s/Mpc. Levando-se em conta a desaceleração causada pela atracção gravitacional, a idade do Universo é entre 9 e 14 bilhões de anos. Por outro lado, calculando-se a idade das estrelas mais velhas conhecidas, as estrelas dos cúmulos globulares e as anãs brancas, obtém-se entre 12 e 14 bilhões de anos, ainda consistente com esta idade.

A lei de Hubble então diz que há ~13 biliões de anos atrás todas as galáxias do Universo estavam num mesmo ponto, juntas. Os astrónomos, na verdade, acreditam que não só as galáxias, mas também toda a radiação e matéria, tudo,

estava confinado num ponto naquele instante. As posições e velocidades actuais das galáxias são decorrentes do primeiro impulso, que marca o começo do Universo, chamado de "*Big Bang*".

Medindo a constante de Hubble, H_O, podemos então deduzir a idade do Universo. Esta medida é portanto incerta, não só porque H_O não é conhecido exactamente, mas também porque a suposição de que a velocidade de recessão é constante não é correcta. Na verdade, acredita-se que as galáxias tinham velocidades mais altas no passado e vêm desacelerando pelos efeitos da gravidade. Assim a idade do Universo é finita.

Esta é a explicação de porque é que o céu é escuro à noite. O paradoxo de Olbers pode ser resolvido pela evolução do Universo. Nós vemos uma parte finita do Universo, a região dentro de aproximadamente 13 biliões de anos de nós. O que está além disto não sabemos, esta luz ainda não teve tempo de chegar até nós.

4.4.3 O Big Bang

Sabemos quando o Big Bang ocorreu. Mas existe alguma maneira de dizer *onde* este ocorreu? O princípio cosmológico diz que o Universo é o mesmo em todos os lugares. Mas a Lei de Hubble, a expressão para a velocidade de recessão das galáxias, implica que todas as galáxias foram criadas num ponto, num dado momento no passado. Este ponto não era então diferente do resto do Universo, violando a suposição de homogeneidade expressa pelo princípio cosmológico? A resposta é NÃO.

Para entender porque não há um "centro" para a expansão temos que mudar um pouco a nossa percepção do Universo. Se considerarmos que o Big Bang foi simplesmente uma explosão enorme que varreu a matéria para dentro do espaço e formou as galáxias que vemos, neste caso deve existir um centro e uma borda e o princípio cosmológico não pode ser aplicado. Mas o Big Bang não foi uma explosão num Universo vazio. A única maneira que respeita ao mesmo tempo a Lei de Hubble e o princípio cosmológico seria se o Big Bang tivesse envolvido o Universo inteiro, e não só a matéria e radiação dentro dele. Por outras palavras, as galáxias não se expandiram dentro do resto do Universo. O Universo em si expandiu-se e está a expandir-se. Como passas num bolo dentro de um forno,

que se distanciam à medida que o bolo cresce, as galáxias estão simplesmente a ser levadas com o movimento geral do Universo.

A lei de Hubble descreve a expansão do Universo como um todo, não existe espaço além das galáxias dentro do qual elas se expandem. No momento do Big Bang, as galáxias não residiam num ponto localizado num lugar definido dentro do Universo. O Universo como um todo era um ponto. Este ponto não era diferente do resto do Universo. Ele *ERA* o Universo. Portanto, não havia nenhum ponto onde o Big Bang ocorreu - este ocorreu em todos os lugares de uma só vez.

Para entender melhor estas ideias, imagine-se um balão com papelinhos colados à sua superfície. Os papelinhos representam galáxias e a superfície bi-dimensional do balão representa uma analogia com o nosso Universo tridimensional. O princípio cosmológico aplica-se aqui porque todos os pontos do balão parecem iguais a qualquer outro. Suponha-se que se está numa das galáxias/papelinho do balão. À medida que se enche o balão vê-se as outras galáxias a distanciarem-se. Os papelinhos mais distantes distanciam-se mais rapidamente. Os papelinhos não se expandem juntamente com o balão, da mesma maneira que galáxias, estrelas e pessoas também não se expandem com o Universo.

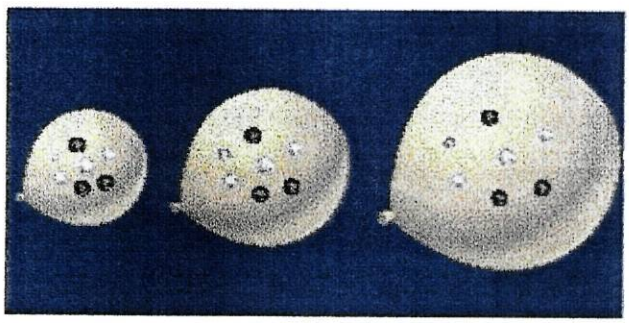


Figura 4.4 - Modelo das contas num balão, similar aos papelinhos, para explicação do processo de expansão do Universo.
Retirado de http://www.iagusp.usp.br/~jatenco/aga215/cap16/cap16.htm

Esta ideia forma a base do princípio cosmológico: nenhum observador em nenhum lugar tem uma posição privilegiada. Não existe centro da expansão e não há posição que possa ser identificada como aquela onde o Universo começou. Todos vêm uma expansão geral descrita pela lei de Hubble, com a mesma constante de Hubble em todos os casos.

Agora imagine-se que se deixa o balão esvaziar de uma só vez. Isto comparar-se-ia ao nosso Universo voltando à sua forma original, com o tempo voltando ao passado, em direcção ao Big Bang. Todos os papelinhos chegariam ao mesmo lugar, ao mesmo tempo, o momento quando o balão atinge um tamanho "zero". Mas não se poderia encontrar um ponto no balão que se pudesse dizer que é o local onde isto ocorre. O balão inteiro evolui de um ponto, da mesma forma que o Big Bang envolveu o Universo todo e evoluiu de um ponto.

4.4.4 "Redshift" Cosmológico

Esta visão do Universo em expansão requer que se reinterprete o conceito de "redshift" cosmológico. Até agora tem-se explicado o "redshift" de galáxias como um desvio de Doppler, em consequência do movimento relativo destas em relação a nós. Mas agora sabe-se que o "redshift" cosmológico é na verdade uma consequência da expansão do Universo. O "redshift" de um fotão mede quanto o Universo se expandiu desde o momento que aquele fotão foi emitido.

4. 5 Destino do Universo

Actualmente o Universo está a expandir-se. Esta expansão vai continuar sempre? Se não for, o que acontecerá então? E quando? Estas questões são fundamentais para o entendimento do destino do Universo. Podemos tentar responder a estas perguntas atacando um problema mais simples e mais familiar que se descreve de seguida.

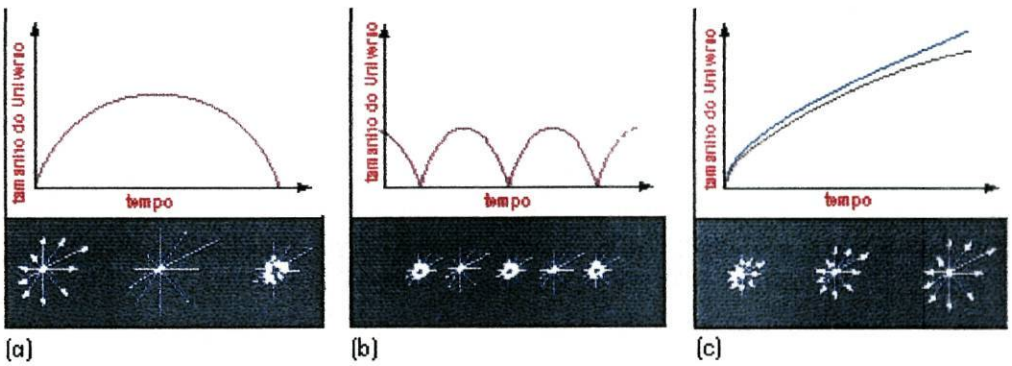


Figura 4.5- Tamanho do Universo x tempo (a) Universo fechado (b) cíclico (c) aberto e infinito.

Retirado de http://pcastro7.if.ufrgs.br/univ/

4.5.1 Densidade Crítica

Considere um foguete lançado da superfície de um planeta. Como será o movimento deste foguete? Há duas possibilidades, dependendo da velocidade inicial do foguete. Se a velocidade de lançamento é suficientemente grande, o foguete excederá a velocidade de escape do planeta e nunca mais voltará à sua superfície. A velocidade diminuirá devido à força gravitacional do planeta (que diminuirá cada vez mais), mas o foguete nunca terá velocidade zero. O foguete terá uma órbita "não ligada".

Alternativamente, se o foguete tiver uma velocidade de lançamento que é menor que a velocidade de escape, este atingirá um máximo de distância ao planeta e depois cairá de volta na sua superfície. O foguete terá então uma órbita "ligada".

O mesmo tipo de argumento pode ser usado para a expansão do Universo. Imagine-se duas galáxias cuja distância entre elas é conhecida. As suas velocidades de recessão são dadas pela Lei de Hubble. As mesmas duas possibilidades existem para estas galáxias, como para o foguete. Ou a distância entre as galáxias pode crescer indefinidamente, ou a distância pode crescer até um certo ponto e depois diminuir. O que o princípio cosmológico diz é que o mesmo que se aplica às duas galáxias se aplicará a todo o Universo.

Existe ainda uma terceira alternativa que seria uma situação intermediária entre a órbita "ligada" e "não-ligada": uma "quase ligada". Neste caso o Universo estaria indefinidamente em expansão, mas com uma velocidade cada vez menor, análogo ao caso do foguete que deixa o planeta com exactamente a velocidade de escape. Estas três possibilidades apresentam possíveis cenários para a evolução do Universo, como o vemos hoje. A primeira é a teoria do Universo aberto de Friedmann-Lemaître, que nos diz que se a densidade média da matéria do Universo for menor ou igual a um certo valor, o Universo é especialmente infinito e hiperbolicamente curvado e expandir-se-á para sempre. A segunda teoria é a do universo fechado de Friedmann-Lemaître, em que se a constante de Hubble for maior que um certo valor crítico, o espaço-tempo terá uma curvatura que levará à contracção do Universo. O seu espaço é esférico, fechado e finito. Por fim a teoria de Einstein-Sitter prevê que o Universo é plano e aberto e irá expandir para sempre.

O que determina qual destas três possibilidades é a correcta para o Universo? Em todos os casos a gravidade desacelerá a expansão do Universo com o

tempo. Quanto mais matéria existir no Universo maior será a força contra a expansão, ou seja, maior será a força que evita que o foguete escape. Num Universo de alta densidade, há massa suficiente para a expansão do Universo causar um recolapso. Neste caso o Universo é fechado. No outro extremo temos o caso do Universo que se pode expandir indefinidamente, que é o Universo aberto. A linha divisória entre estes dois casos é aquela onde a densidade corresponde exactamente a densidade crítica. Para H_0 de 75 km/s/Mpc, a densidade crítica é de 10^{-26} kg/m^3. Esta é uma densidade extremamente baixa, de apenas seis átomos de hidrogénio por metro cúbico.

4.5.2 Dois Futuros

Se o Universo começou, durante o Big Bang, com uma densidade acima da densidade crítica, então este contém bastante matéria para a sua expansão. A expansão das galáxias vai eventualmente terminar e o Universo começará a contrair-se. O Universo, ao contrair ficará cada vez mais denso e quente, à medida que for chegando de volta à sua condição inicial de um único ponto. Dizemos que este Universo terá uma "morte quente".

Os cosmologistas não sabem o que aconteceria se o Universo chegasse ao ponto de colapso. Alguns acham que haveria a possibilidade de que a força da gravidade contrariar esse movimento e impulsionasse o Universo de volta para uma posição de expansão antes da chegada de volta à singularidade inicial. Isto colocaria o Universo num ciclo de contracções e expansões. Logicamente isto é só uma especulação, e não se sabe se realmente acontecerá.

Se o Universo começou, durante o Big Bang, com uma densidade abaixo da densidade crítica, o seu destino é bem diferente do descrito acima. Neste caso, a sua densidade sempre foi e sempre será inferior à necessária para fazer com que o Universo se volte a contrair, e o Universo expandirá indefinidamente. Neste cenário as galáxias continuarão a afastar-se umas das outras e as suas radiações ficarão cada vez mais fracas com as grandes distâncias. Num dado momento um observador na Terra, mesmo com os telescópios mais sensíveis, não verá mais galáxias além do Grupo Local. O Universo aparecerá escuro, as galáxias distantes serão muito fracas para se detectar. Eventualmente a Via Láctea e o Grupo Local ficarão sem energia também. Dizemos que este Universo

terá uma "morte fria". Toda a radiação, matéria e vida estão destinadas a congelar.

No caso intermediário de um Universo com a densidade crítica, este contém exactamente a matéria necessária para eventualmente parar a expansão do Universo, mas somente após um tempo infinito. Este Universo expandirá indefinidamente também.

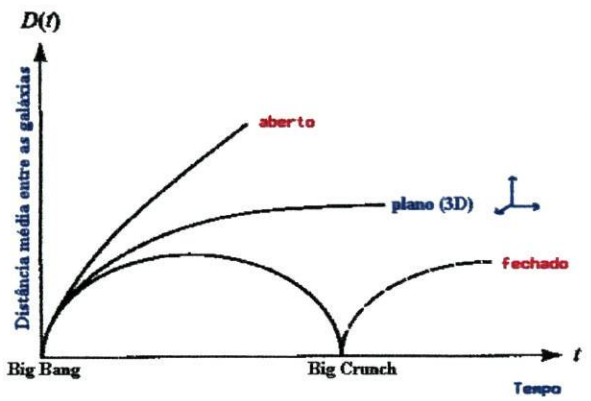


Figura 4.6 - Tipos de Universo

Retirado de http://pcastro7.if.ufrgs.br/univ/

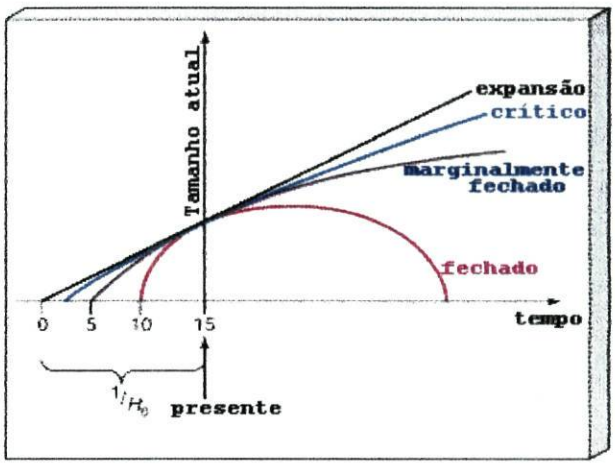


Figura 4.7 O universo no tempo

Retirado de http://pcastro7.if.ufrgs.br/univ/

4.5.3 O Universo expandirá indefinidamente?

Haverá alguma maneira de determinar qual dos modelos de Universo realmente descreve o que acontecerá? A maneira mais directa de se tentar responder a esta pergunta é estimar a densidade do Universo, porque a densidade é a propriedade principal que distingue um modelo de Universo do outro. Como já foi dito, para H_o=75km/s/Mpc, a densidade crítica que separa os dois "futuros" é de 10^{-26} Kg/m^3. Os cosmologistas convencionalmente chamam à razão da densidade real pela densidade critica de "parâmetro de densidade cósmica" e denotam este valor pelo símbolo Ω_o. O Universo tem a densidade crítica, expressa nestes termos, se $\Omega_o = 1$. Se $\Omega_o<1$ o Universo expandirá indefinidamente e se $\Omega_o>1$ o universo terá um novo colapso.

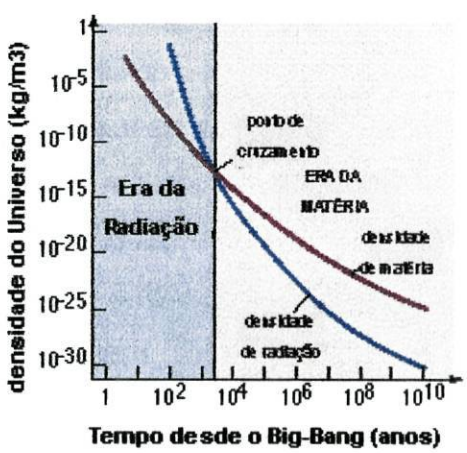


Figura 4.8 - Densidade do Universo x tempo, e as eras cosmológicas. Retirado de http://www.iagusp.usp.br/~jatenco/aga215/cap16/cap16.htm

Como determinar a densidade média do Universo? Uma maneira simples seria simplesmente :

1º medir a massa média das galáxias que residem num dado espaço,

2º calcular o volume deste espaço,

3º usar as anteriores para determinar a densidade de massa deste espaço.

Quando os astrónomos fazem este cálculo encontram uma densidade em forma de matéria luminosa, que é um pouco menor que 10^{-28} kg/m^3. Este resultado depende pouco do que contém o espaço escolhido, se aglomerados ricos, vazios, etc. O resultado para a densidade é sempre o mesmo, dentro de um factor 2 ou 3. As contagens de galáxias dão então um valor de $\Omega_0 = 0{,}01$. Se esta medida está correcta o Universo expandirá para sempre.

Mas há ainda uma outra consideração importante. A maior parte da matéria do Universo é escura. No momento, não sabemos exactamente os constituintes da matéria escura mas sabemos que ela está presente, devido aos efeitos que tem sobre os corpos. As galáxias podem conter 10 vezes mais matéria escura do que matéria luminosa e os aglomerados podem conter ainda mais. Cerca de 95% da massa de um aglomerado pode ser de matéria escura. Mesmo que não possamos vê-la, a matéria escura contribui para a densidade total do Universo. Se incluímos a matéria escura na determinação do valor de Ω_0 chegamos a um valor de 0.2 ou 0.3, ainda bem menor que o valor 1, implicando que o Universo se deve expandir indefinidamente.

Infelizmente, a distribuição de matéria escura em escalas ainda maiores que aglomerados não é conhecida. Podemos detectar a sua influência em galáxias e aglomerados de galáxias mas não sabemos os seus efeitos em superaglomerados, vazios e em outras grandes estruturas. Entretanto, temos algumas evidências de que o efeito da matéria escura nestas grandes estruturas é ainda maior do que em aglomerados de galáxias. Por exemplo, observações dos movimentos de galáxias no superaglomerado local sugerem a presença de uma acumulação enorme de massa chamada de "Grande Atractor", com massa total de cerca de 10^{17} massas solares e um tamanho de 100 a 150 Mpc. Se as estimativas do tamanho e massa deste objecto enorme estão correctos, então a densidade média do Universo pode ser próxima à densidade crítica.

Podemos dizer então que é possível que a matéria invisível do Universo possa chegar a cerca de 99% da massa total. Neste caso os "vazios" não são vazios

reais, mas estão cheios com uma matéria que não pode ser vista. As galáxias seriam então apenas insignificantes ilhas brilhantes dentro da matéria escura. Se a quantidade de matéria escura nos superaglomerados e grandes estruturas for um factor de 100 vezes ou mais a contribuição das galáxias, então Ω_0 poderá ser também maior que 1 e o Universo terá um recolapso. Este é o motivo pelo qual é tão importante procurar evidências de matéria escura em escalas cada vez maiores. Nos últimos 20 anos o valor de Ω_0 tem aumentado cada vez mais, à medida que tem sido possível usar amostras cobrindo volumes cada vez maiores.

Qual a conclusão afinal? Que destino terá o nosso Universo? A resposta não é conhecida com certeza ainda, mas podemos dizer que, embora o valor de Ω_0 não seja muito preciso, a maioria dos astrónomos acredita que seu valor está entre 0.1 e 1. Logo, a opinião da maioria é a de que o Universo deverá expandir-se para sempre.

4.6 A Idade do Universo

Fizemos anteriormente uma determinação da idade do Universo fazendo uma suposição de que a expansão do Universo teve velocidade constante do passado até o Universo actual. No entanto, se o Universo se expandia mais rapidamente no passado a idade obtida é menor. Por exemplo, no caso do modelo plano, conhecido por modelo de Einstein-De Sitter a idade é de $\frac{2}{3}$ da obtida (13 biliões de anos), ou seja, 9 biliões de anos. Os 13 biliões de anos, dependem da taxa de expansão actual, isto é, da "constante" de Hubble H. Pois H(t) é uma função do tempo.

Até há pouco tempo suponha-se que os efeitos da gravidade desacelerassem a expansão. Era correcto dizer que o Universo se expandia mais rapidamente no passado do que agora. A suposição de que o Universo expandiu com velocidade constante pode ter levado a uma estimativa de idade do Universo que é maior do que a idade real. O Universo deve ser mais jovem que 13 bilhões de anos. Quanto mais jovem depende da desaceleração que ocorreu.

Mas a situação complicou-se entretanto porque os astrónomos descobriram que o Universo actual está a expandir-se aceleradamente e não desaceleradamente, como se pensava até há cerca de 3 anos atrás. Esta aceleração actual pode não

ser duradoura, e pode ser recente, mas não se sabe. Este novo facto complica os cálculos.

Uma razão possível para a aceleração da expansão poderá ser a presença de uma constante cosmológica (positiva). Ora, neste caso, a idade do Universo será maior do que a calculada, para qualquer dos modelos.

4.7 A Geometria do Espaço

A ideia de ter o Universo como um todo expandindo a partir de um único ponto, com nada, nem mesmo espaço e tempo fora deste, não é fácil de aceitar. Este é, entretanto, um dos fundamentos da cosmologia moderna e a grande maioria dos astrónomos não tem dúvida disto. A descrição do Universo como uma estrutura em evolução dinâmica não pode ser feita somente com a mecânica newtoniana. Necessitamos das técnicas introduzidas pela relatividade geral de Einstein, e das suas noções de curvatura do espaço e dinâmica do tempo e espaço.

A teoria da relatividade geral diz que a massa "curva" o espaço na sua vizinhança. Quanto maior a massa, maior a densidade, e maior a curvatura. Mais do que isto, a curvatura tem que ser a mesma em todos os lugares (devido ao princípio cosmológico). Há portanto, somente três possibilidades para a geometria do Universo. Elas correspondem aos três tipos de Universo que discutimos anteriormente.

Se a densidade média do Universo está acima da densidade crítica, o Universo tem uma curvatura tão acentuada que se curva sobre si mesmo, tendo um tamanho finito. Este Universo é chamado de Universo fechado. É impossível visualizar uma figura em três dimensões que tenha estas características mas em duas dimensões ela é simplesmente uma esfera, o balão que já discutimos anteriormente. Como a superfície de uma esfera, o Universo não tem bordas. No entanto ele é finito em extensão.

A esfera tem uma curvatura positiva. Se o Universo, no entanto, tem uma densidade menor do que a densidade crítica, a forma do Universo será bem diferente do análogo de uma esfera em três dimensões. O análogo da forma deste Universo em duas dimensões seria uma forma com curvatura negativa. Este Universo é chamado de Universo aberto. Este Universo é infinito. O caso intermediário, quando a densidade é exactamente igual à densidade crítica, é o mais fácil de se visualizar. O Universo crítico não tem curvatura. Dizemos que é

um Universo plano e é infinito em extensão. Neste caso, e somente neste caso, a geometria do espaço é precisamente a geometria euclidiana, com a qual estamos acostumados.

A geometria Euclidiana, a geometria do espaço plano, é familiar para nós porque é uma boa descrição do espaço na vizinhança da Terra. É a geometria da experiência do dia a dia. Isto quer dizer que o Universo também é plano? A resposta é não. Da mesma maneira que um mapa plano de ruas é uma boa representação de uma cidade, embora a Terra seja redonda, a geometria de Euclides é uma boa descrição do espaço dentro do sistema solar ou mesmo dentro da Galáxia, porque a curvatura do Universo é desprezível em escalas menores que 1000 Mpc. Somente em escalas muito maiores os efeitos da geometria são detectados.

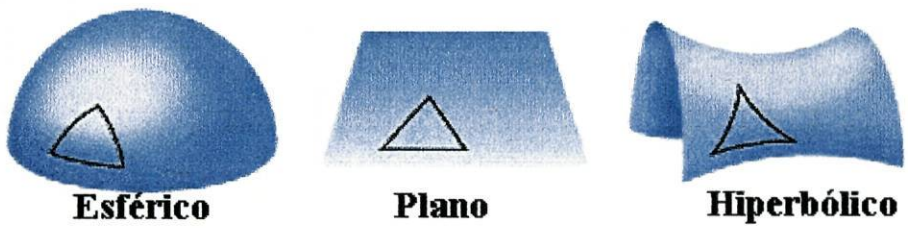


Figura 4.8 As curvaturas do Universo

Retirado de http://pcastro7.if.ufrgs.br/univ/

4.8 A Radiação Cósmica de Fundo

Será que há alguma maneira de estudar o Universo nas suas primeiras fases de formação?

Uma maneira de responder a esta pergunta foi descoberta em 1964, numa experiência que era destinada a melhorar o sistema de telefonia americana. Dois cientistas da companhia de telefones Bell, chamados A. Penzias e R. Wilson, ao estudarem a emissão da Via Láctea no comprimento de onda milimétrico (radio) notaram uma emissão que vinha de todas as direcções. A qualquer hora do dia ou da noite, em qualquer direcção que olhavam, encontravam a mesma emissão, que parecia preencher todo o espaço. Foi então descoberto que este sinal era nada mais nada menos do que a prova da origem do Universo. Este sinal que eles descobriram é chamado de radiação cósmica de fundo. Esta descoberta deu a Penzias e Wilson o Prêmio Nobel em 1978.

Vários astrónomos já tinham previsto a existência da radiação de fundo muito antes desta ser descoberta. Já em 1940 os físicos sabiam que o Universo, próximo da época do Big Bang, era preenchido com radiação termal de alta energia, raios gama a comprimentos de onda muito curtos. Pesquisadores em Princeton estenderam estas ideias, e predisseram que a radiação primordial deveria ter sido deslocada do comprimento de onda de raios gamma para raios X e depois para ultra-violeta, etc, e eventualmente para rádio, à medida que o Universo esfriava. No momento presente, disseram os pesquisadores, esta radiação vinda do Big Bang não poderia ter uma temperatura de mais do que alguns graus Kelvins, apresentando então um pico na região das ondas milimétricas. O grupo de Princeton estava a construir uma antena para medir esta radiação quando Penzias e Wilson fizeram a descoberta.

Os pesquisadores de Princeton confirmaram a existência da radiação de fundo e estimaram a sua temperatura em 3K. No entanto, esta parte do espectro electromagnético é difícil de se observar da Terra e só 25 anos depois os astrónomos puderam demonstrar que a radiação descreve uma curva de corpo negro. Em 1989 o satélite COBE (Cosmic Background Explorer Satellite) mediu a intensidade da radiação de fundo de 0.5 mm até 10 cm. Os resultados mostram a correspondência com uma curva de corpo negro com um pico a temperatura de aproximadamente 2.7K.

Um aspecto surpreendente na radiação de fundo é o seu grau de isotropia. Quando corrigimos para o movimento da Terra no espaço (porque este movimento faz com que a radiação de fundo pareça um pouco mais quente que a média em frente de nós, e mais fria atrás de nós), a intensidade da radiação é essencialmente constante de uma parte do céu para outra. Esta isotropia é uma forte evidência de que o princípio cosmológico é correcto.

É importante notar que a radiação de fundo contém mais energia que a soma de todas as galáxias e estrelas que jamais existiram. A razão é simples. Galáxias e estrelas são mais brilhantes mas ocupam um volume muito menor. Quando somamos a energia da radiação de fundo em toda a sua extensão, ela excede a energia dos outros corpos por um factor de pelo menos 10. A radiação de fundo é então a forma de radiação mais significativa do Universo.

4.9 Matéria e Radiação

A densidade global da matéria no Universo não é conhecida ao certo, mas pensamos que é provavelmente próxima ou menor que a densidade crítica de 10^{-26} kg/m^3. O Universo é aparentemente aberto, ou próximo disso. Acabamos de ver que a maior parte da radiação do Universo está na forma de radiação de fundo. Sabemos que matéria e energia são equivalentes. Como se comparam então estas duas formas de energia? É a matéria, ou a radiação, o principal constituinte do Universo em largas escalas?

Para responder a esta pergunta temos que converter matéria e radiação num "elemento comum", ou em massa ou em energia. Comparemos as suas massas. Podemos expressar a energia da radiação de fundo como uma densidade equivalente, primeiro calculando o número de fotões num metro cúbico de espaço e depois transformando esta energia total dos fotões em massa, usando a relação $E=mc^2$. Quando fazemos isto, concluímos que a densidade da radiação de fundo é aproximadamente 5×10^{-30} kg/m^3. Concluímos, então, que neste momento a densidade da matéria do Universo excede em várias ordens de magnitude a densidade da radiação. Dizemos que estamos a viver num Universo que é dominado pela massa (ao invés de dominado pela radiação).

Será que o Universo foi sempre dominado pela massa? Para responder a esta pergunta temos que estudar o comportamento das densidades de massa e radiação durante a evolução do Universo. Ambas diminuem, à medida que o Universo se expande e dilui o número de fotões e de átomos. Porém a radiação é diminuída também em energia devido ao "redshift" cosmológico. Logo, a sua densidade equivalente cai mais rapidamente que a densidade da matéria, à medida que o Universo se expande.

Se pudéssemos olhar para "trás" no tempo, para próximo do Big Bang, veríamos que a densidade de radiação aumentava muito mais rapidamente que a densidade de matéria. Embora hoje em dia a densidade de radiação seja bem menor que a densidade de matéria, deve ter existido um momento no passado quando estas duas eram comparáveis. Antes daquele momento, a radiação era a constituinte principal do Universo. Dizemos que aquele Universo era dominado pela radiação.

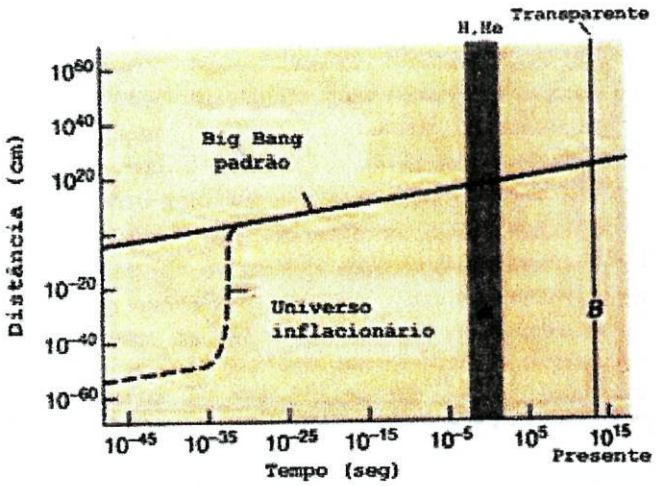


Figura 4.9 – O universo e a matéria

Retirado de http://pcastro7.if.ufrgs.br/univ/

4.10 Relatividade Geral

Em 1905 Albert Einstein (1879-1955) propôs a teoria da relatividade especial (ou restrita). Esta teoria propunha que a velocidade da luz no vácuo é constante, independente da velocidade da fonte, que a massa depende da velocidade, que há dilatação do tempo durante movimento em velocidade alta, que massa e energia são equivalentes e que nenhuma informação ou matéria se pode mover mais rápido do que a luz. A teoria é a especial somente porque estava restrita ao caso em que os campos gravitacionais fossem pequenos, ou desprezíveis. Embora a teoria da relatividade geral, proposta por Einstein em 1916, só difira da teoria da gravitação de Isaac Newton (1643-1726) em poucas partes por milhão na Terra, em grandes dimensões e grandes massas, como as que envolve o Universo, ela é bastante diferente.

A teoria da relatividade geral é universal no sentido de ser válida mesmo nos casos em que os campos gravitacionais não são desprezáveis. Enquanto na teoria de Newton o espaço é rígido, descrito pela geometria Euclidiana [Euclides de Alexandria (c.365-300 a.C.)], na relatividade geral o espaço-tempo é distorcido pela presença da matéria que ele contém. Um ano depois de propor a relatividade geral, em 1917, Einstein publicou seu artigo histórico sobre cosmologia, *Considerações Cosmológicas sobre a Teoria da Relatividade*, construindo um modelo esférico do Universo. Como as equações da Relatividade Geral não levavam directamente a um Universo estático de raio finito, a mesma dificuldade encontrada com a teoria de Newton, Einstein modificou as suas equações, introduzindo a **constante cosmológica**, para obter um Universo

estático, já que ele não tinha nenhuma razão para supor que o Universo estivesse a expandir ou a contrair. A constante cosmológica age como uma força repulsiva que previne o colapso do Universo pela atracção gravitacional. O holandês Willem de Sitter (1872-1934) demonstrou em 1917 que a constante cosmológica permite um Universo em expansão mesmo que este não contenha qualquer matéria. Esta é, portanto também chamada de energia do vácuo.

4.10.1 Lentes Gravitacionais

A previsão da relatividade geral de que um raio de luz é desviado ao passar por um corpo massivo foi confirmada em 1919 por uma expedição dupla chefiada pelo astrónomo inglês *Sir* Arthur Stanley Eddington (1882-1944), a Sobral, no Ceará, e à ilha de Príncipe, na África, para medir a posição das estrelas durante um eclipse total do Sol. A expedição ao Brasil foi coordenada pelo inglês Andrew Claude de Cherois Crommelin (1865-1939), que retornou com 7 fotografias. Eddyton mediu a distância entre as estrelas à esquerda do Sol e as estrelas à direita do Sol durante o eclipse, quando as estrelas estão visíveis pelo curto espaço de tempo do eclipse, e comparou-a com a distância entre as mesmas estrelas obtidas 6 meses antes, quando elas eram visíveis à noite, Eddington encontrou que as estrelas pareciam mais distantes umas das outras durante o eclipse e concluiu que os raios de luz destas estrelas foram desviados pelo campo gravitacional do Sol, como previsto por Einstein.

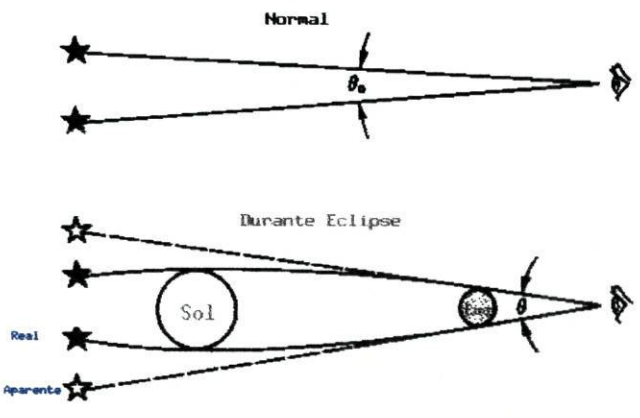


Figura 4.10 - Esquema do desvio provocado pelo campo gravitacional do Sol na luz

Retirado de http://pcastro7.if.ufrgs.br/univ/

O desvio previsto era de

$$\Theta - \Theta_0 = \frac{1,7''}{\nabla}$$

gera uma distância de ∇ raios do Sol do centro do Sol. As duas expedições obtiveram 1,98 +/- 0,30" e 1,61 +/- 0,30", confirmando a teoria. A razão pela qual se realizam estas medidas durante um eclipse, é que durante um eclipse podemos ver e medir as distâncias de estrelas próximas ao disco do Sol.

4.10.2 Deslocamento do periélio do planeta Mercúrio

Outra comprovação importante da Teoria da Relatividade Geral foi a observação do deslocamento do periélio de Mercúrio de 43" por século, já detectado pelo francês Urbain Jean Joseph Le Verrier (1811-1877) em 1859. Este não pode ser explicado pela teoria Newtoniana, mas é perfeitamente descrito pela teoria da relatividade. Enquanto na teoria de Newton somente a massa contribui para a gravidade, na teoria de Einstein a energia cinética associada ao movimento dos planetas também contribui.

Representação do deslocamento do periélio de Mercúrio com o tempo. O espaço-tempo é perturbado pela presença da massa do Sol, exactamente como predito pela Teoria da Relatividade Geral.

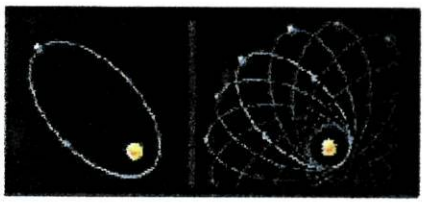


Figura 4.11 – Representação da variação do periélio

Retirada de http://pcastro7.if.ufrgs.br/univ/

O periélio de Vênus também se desloca, mas de 8,6" por século, e o da Terra de 3,8" por século, ambos já medidos.

4.10.3 Medida da taxa de redução do período orbital

Mas a observação mais crucial para a comprovação da teoria da relatividade, ainda é a da medida da taxa de redução do período orbital do pulsar binário PSR 1913+16 -- duas estrelas de neutrões -- descoberto por Russell Alan Hulse (1950-) e Joseph Hooton Taylor Jr. (1941-) em 1974, utilizando a antena de 305 m de diâmetro do rádio - telescópio de Arecibo. O período orbital é de 7,75 horas, e o período de rotação do pulsar de 59 milisegundos. A taxa de redução do período orbital, de 76,0±0,3 milionésimos de segundos por ano,

concorda com precisão melhor do que 1% com o cálculo de perda de energia devido à emissão de ondas gravitacionais, previstas pela teoria de Einstein. A teoria da relatividade geral prediz que massas aceleradas emitem ondas gravitacionais, da mesma maneira que cargas eléctricas aceleradas produzem ondas electromagnéticas. As ondas gravitacionais são perturbações na curvatura do espaço - tempo que se propagam à velocidade da luz.

4.11 A Formação de Núcleos e Átomos

No momento do Big Bang, o Universo era muito quente e denso. Este tem expandido e arrefecido desde então. Nos primeiros momentos do Universo só existia radiação. Durante os primeiros minutos de existência, as temperaturas eram tão altas que os fotões tinham energia suficiente para se transformar em matéria, na forma de partículas elementares. Neste período os primeiros protões, neutrões, electrões e matéria escura foram criados. Desde então a matéria evoluiu, aglomerando-se e formando núcleos, átomos, planetas, estrelas, galáxias e estruturas em grandes escalas. Mas não há nenhuma matéria nova criada. Tudo que vemos ao redor de nós, foi criado da radiação, à medida que o Universo primordial expandiu e arrefeceu.

4.11.1 Formação de Hélio

Actualmente sabemos que existe muito mais hélio no Universo do que pode ser explicado pela formação dentro de estrelas por fusão nuclear. Existe um valor mínimo de hélio que é observado em todas as estrelas que é 25% em massa. A explicação é que este hélio deve ser primordial, ou seja, criado antes das estrelas terem sido formadas. A produção de elementos mais pesados que o hidrogénio por fusão nuclear, logo depois do Big Bang, é chamada de nucleossíntese primordial.

Aproximadamente 100s depois do Big Bang a temperatura tinha baixado para 1 bilião de kelvins e, fora as partículas "exóticas", a massa do Universo consistia de electrões, protões e neutrões. A quantidade de protões era maior que a de neutrões por um factor 5. Reacções de fusão entre protões e neutrões para formar deutério (uma forma pesada de hidrogénio - o núcleo do deutério contém um protão e um neutrão) eram muito frequentes.

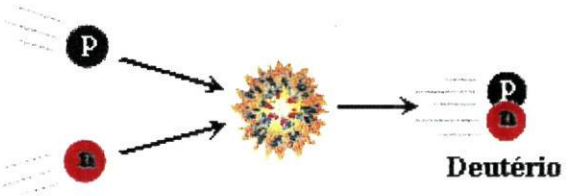


Figura 4.12 Formação de deutério

Retirada de http://pcastro7.if.ufrgs.br/univ/

Entretanto, a matéria era envolvida num "mar" de radiação e os núcleos de deutério eram destruídos por raios gamma, de alta energia, com a mesma rapidez com que eram formados. Somente quando a temperatura do Universo caiu abaixo de 900 milhões de Kelvin, aproximadamente 2 minutos depois do Big Bang, é que o deutério se pôde formar sem ser destruído. Após isto, muitas outras fusões ocorreram e transformaram o deutério em elementos mais pesados, especialmente em Hélio 4. Em apenas alguns minutos a maioria dos neutrões foram consumidos, deixando o Universo com um conteúdo que era na sua maioria núcleos de hidrogénio e hélio.

Enquanto a maioria do deutério se transformou em hélio nesta época, uma pequena fracção continuou a existir como deutério e é observado ainda hoje. Esta observação é muito importante, pois ao contrário do hélio e dos outros elementos, o deutério não é formado nas estrelas e portanto sabemos que todo deutério detectado deve ser primordial.

Poderíamos supor que a fusão no Universo primordial continuaria para elementos mais pesados, como acontece no centro das estrelas, mas na verdade este não foi o caso. O motivo é que enquanto no núcleo das estrelas a temperatura vai aumentando, possibilitando a queima de elementos mais pesados, no Universo acontece exactamente o contrário, a temperatura diminui cada vez mais, à medida que o Universo se expande. Aproximadamente 15 minutos depois do Big Bang, o Universo tinha a sua abundância cósmica em 75% hidrogénio e 25% de hélio. Só biliões de anos depois é que estes valores começaram a mudar, após o início da formação das estrelas.

4.11.2 A Formação dos Átomos

Quando o Universo tinha alguns milhares de anos, a matéria começou a dominar sobre a radiação. O período durante o qual núcleos e electrões se combinaram para formarem átomos é frequentemente chamado de época de

"desacoplamento", pois foi durante este período que a radiação e a matéria se desacoplaram. Em períodos anteriores, quando toda a matéria era ionizada, o Universo era cheio de electrões livres, que frequentemente interagiam com a radiação electromagnética em todos os comprimentos de onda. Como resultado, um fotão não podia viajar grandes distâncias, pois encontrava logo um electrão e era espalhado. Por isso o Universo era opaco à radiação (como as partes interiores de uma estrela como o Sol). Dizemos que nesta época a matéria e a radiação eram fortemente "acopladas" uma à outra, devido a estas interacções. Quando os electrões se combinaram com os núcleos para formarem os átomos de hidrogénio e hélio, só radiação em alguns comprimentos de onda passou a poder interagir com a matéria. A radiação noutros comprimentos de onda pôde viajar, essencialmente para todas as direcções, sem ser absorvida. O Universo tornou-se quase transparente. Deste momento em diante os fotões passaram a circular livremente no espaço. À medida que o Universo se expandiu, a radiação simplesmente arrefeceu, tornando-se na radiação de comprimento de onda milimétrico que medimos hoje e radiação cósmica de fundo.

Os fotões da radiação milimétrica que detectamos na Terra hoje estão a atravessar o Universo desde que a matéria e a radiação se desacoplaram. A última interacção destes fotões com a matéria (na época do desaclopamento) ocorreu quando o Universo tinha aproximadamente alguns 100 mil anos e era aproximadamente 1500 vezes menor (e mais quente) do que é hoje.

A nucleossíntese no Big Bang só formou os elementos leves: hidrogénio, hélio e lítio.

4.12 Inflação Cósmica

4.12.1 O problema do horizonte e da planura

No final dos anos 70, os cosmologistas, ao tentarem descrever a evolução do Universo num cenário consistente, foram confrontados com dois problemas que não eram fáceis de explicar, tendo em vista o modelo do Big Bang. O primeiro é conhecido como o problema do horizonte. Imagine-se a fazer uma observação da radiação cósmica de fundo vinda de duas regiões opostas do Universo actual. Estas regiões que observa estão distantes uma da outra, mas mesmo assim a radiação é exactamente a mesma nos dois pontos (porque a radiação é

isotrópica). Como poderia isto acontecer, se estes pontos não tiveram contacto um com o outro? Como pode ser que a informação de um chegou até o outro, sem estes nunca terem tido interacção? Como sabe um ponto da existência do outro e parece exactamente igual? Não houve tempo da informação ser transferida de um ponto ao outro, porque esta não pode ser transmitida com uma velocidade maior que a da luz. Este paradoxo chamou-se de "problema do horizonte".

O segundo problema com o modelo de Big Bang é o problema da planura. Os astrónomos acham que o valor de Ω_0 é aproximadamente 1, ou seja, a densidade do Universo é próxima da densidade crítica. Mas porquê esta coincidência? Porque é que Ω_0 não é um milhão de vezes maior ou menor que este valor? O problema fica ainda maior quando notamos que, se o Universo tem uma densidade próxima da crítica hoje, ele deve ter tido uma densidade ainda mais próxima da crítica no passado. Um Universo que tivesse começado com um valor de densidade diferente da crítica ter-se-á desviado deste valor muito rapidamente. Mas este não foi o caso. Se medimos hoje em dia um Ω_0 de 0.1, por exemplo, na época da nucleossíntese este valor teria sido 1.0, com um erro de uma parte em 10^{15}. Este problema constitui o problema da planura. Porquê esta coincidência? Porque é que Ω_0 é próximo de 1?

Estes dois problemas podem ser resolvidos com a Teoria da Inflação.

4.12.2 A Época da Inflação

Nos anos 70 e 80 os físicos teóricos tentaram unificar as três forças não-gravitacionais do Universo, o electromagnetismo, a força "forte" (a força que une protões e neutrões dentro de um núcleo) e a força "fraca" (aquela que tem um papel importante nos decaimentos radioactivos), numa super força generalizada. Uma previsão geral das teorias de unificação que descrevem as super forças é que as três forças são unificadas e não

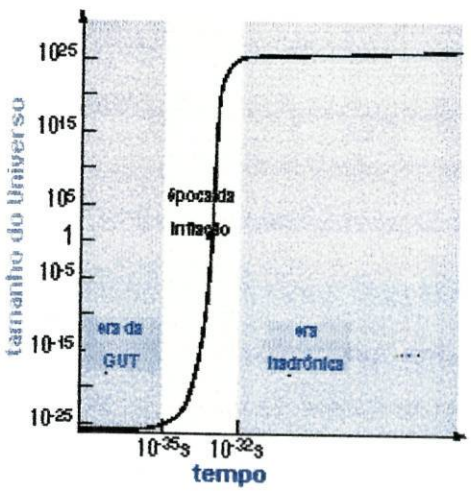


Figura 4.12 - Inflação cósmica

http://www.iagusp.usp.br/~iatenco/aga215/cap16/cap16.htm

correspondendo a temperaturas maiores que 10^{28} K. A temperaturas baixas a super força divide-se em três, revelando o carácter de forca electromagnética, forte ou fraca.

No começo dos anos 80 os cosmologistas descobriram que as teorias de unificação tinham uma implicação extraordinária aplicada ao começo do Universo. Aproximadamente 10^{-34} s após o Big Bang, as temperaturas caem abaixo de 10^{28} K e as forças básicas da natureza reorganizam-se (assim como gás que liquidifica quando a temperatura abaixa): o Universo, por um período de tempo muito curto, entra num estado instável, de alta energia, o "falso vácuo". Na verdade, o que aconteceu, foi que o Universo continuou na condição "unificada" por um período longo demais, como água que não se torna ainda congelada mesmo quando é colocada a temperaturas abaixo de zero graus. Isto teve consequências dramáticas para o Universo. Por um tempo curtíssimo, o espaço vazio adquiriu uma pressão enorme, que temporariamente foi maior que a gravidade e acelerou a expansão do Universo a uma taxa altíssima. A pressão continuou constante à medida que o cosmos se expandiu, e a aceleração aumentou mais e mais com o tempo.

O tamanho do Universo duplicou a cada 10^{-34}s mais ou menos. Este período de grande expansão cósmica é conhecido como a época da inflação.

Eventualmente, o Universo retornou para o estado de "vácuo verdadeiro". Regiões de espaço normal começaram a aparecer dentro do "vácuo falso" e rapidamente estas regiões foram espalhadas por todo o cosmos. Com a volta do "vácuo verdadeiro" a inflação parou. O episódio inteiro durou somente 10^{-32} s, mas durante este tempo o Universo aumentou em tamanho por um factor de 10^{50}. Com o vácuo normal, o Universo retomou a sua expansão relativamente lenta, como anteriormente à fase de inflação, tendo o seu movimento desacelerado pela gravidade. No entanto, algumas mudanças importantes tinham ocorrido durante esta fase curta da inflação.

4.12.3 Implicações para o Universo

A época da inflação oferece uma solução natural para os problemas de horizonte e de planura. O problema de horizonte é resolvido, porque a inflação trouxe regiões que já tinham tido tempo de se comunicar para posições bem distantes

umas das outras, fora de comunicação. O Universo durante a época da inflação expandiu muito mais rapidamente do que a velocidade da luz. Logo, regiões que antes da inflação poderiam ter estado muito próximas, foram levadas para pontos afastados (a relatividade restringe a velocidade da matéria e energia como sendo sempre menor que a da luz mas não restringe a velocidade do Universo como um todo). As propriedades de duas regiões opostas no Universo actual podem então ser as mesmas porque estas regiões estavam em contacto antes da inflação.

A solução para o problema da planura é dado da seguinte maneira. A época da inflação "esticou" o Universo tanto e tanto que o Universo é na verdade plano. Qualquer curvatura que o Universo possa ter tido antes da inflação foi completamente destruída pela enorme expansão, fazendo com que o Universo ficasse perfeitamente plano. Devido a este fato, Ω_0 tem então que ser 1. A ser verdade, isto quer dizer que a grande maioria da massa do Universo está na forma invisível (matéria escura). Tal não foi ainda provado observacionalmente.

Quando a ideia da inflação surgiu pela primeira vez, muitos astrónomos não acreditaram nela (alguns ainda não acreditam hoje). O problema é que não há nenhuma evidência observacional directa para uma densidade cósmica que seja tão alta quanto a densidade crítica. No entanto, há muitas evidências que mostram que a matéria escura pode equivaler a pelo menos 20% a 30% da densidade crítica e estimativas de Ω_0 parece que aumentam quando as escalas que são consideradas aumentam. Outro ponto é que a inflação é uma previsão clara da teoria de grupo (de unificação) que está se a tornar cada vez mais estabelecida como instrumento para descrição da matéria a altas energias.

Capítulo 5 - Interacção gravítica

5.0 Interacção Gravítica

Neste capítulo estuda-se uma das forças unificadoras do Universo e alguns fenómenos associados a ela. Apresenta-se também uma breve resenha histórica.

5.1 Introdução

A nossa experiência diária mostra que para manter um corpo em movimento ele precisa de ser empurrado e que todos os corpos caem se não são sustentados de alguma forma. Então, ao olhar para o céu uma questão surge: Por que é que os astros não seguem estas regras, já que não existe, aparentemente, nada que os empurre ou sustente?

Como eles se movem e não caem, uma forma para tentar explicar estes factos poderia residir no facto de, alguma forma, a sua sustentação estar associada ao seu movimento.

Desde sempre que o homem observa movimentos, seja o movimento dos astros no céu, seja o movimento de objectos na Terra. A partir do século XVII, começou-se a relacionar o movimento dos astros no céu com o movimento dos objectos na Terra. Essa ligação foi essencial para se desenvolver a Física. Qual é a causa do movimento e das alterações do movimento, quer na Terra, quer no céu?

A gravidade é a força básica do Universo. Dos movimentos do oceano até à expansão do Universo, um vasto intervalo de fenómenos astronómicos são controlados pela gravidade. Newton resumiu a gravidade na sua lei do inverso do quadrado. Einstein viu nela algo de significado mais profundo, de tal forma que interligou o espaço e o tempo. Os físicos modernos estão à procura de uma teoria unificadora das forças básicas. No entanto, a gravidade ainda permanece um enigma.

Os fenómenos astronómicos forneceram e continuam a fornecer um grupo peculiar de estudo da gravidade. Estes fenómenos incluem o movimento dos

planetas, cometas e satélites; a estrutura e evolução das estrelas, os efeitos de maré na Terra e sistemas binários de estrelas; objectos de alta densidade, tal como estrelas de neutrões, buracos negros; e a própria origem e evolução do Universo.

5.2 O Universo irrequieto

Da antiga mitologia Hindu surge a história da Estrela Polar: o rei Uttanapada tinha duas mulheres. A favorita, Suruchi, era arrogante e orgulhosa, enquanto a neglicenciada Suniti era gentil e modesta. Um dia Dhruva, filho de Suniti viu o seu meio irmão Uttama a brincar no circuito do pai. Dhruva quis se juntar para brincar, mas foi rapidamente expulso por Suruchi, que entretanto surgiu. Sentindo-se insultado, Dhruva de cinco anos, desejou estar num local de onde não tivesse de sair. Este seu desejo foi ouvido pelo seu deus protector Vishnu, que, vendo a sua tristeza, lhe satisfez o desejo. Vishnu colocou-o no local conhecido como Estrela Polar, numa posição para sempre fixa.

Ao contrário das outras estrelas e planetas, a Estrela Polar é vista sempre no mesmo local do céu. Esta imobilidade da Estrela Polar forneceu um meio de navegação muito útil para os marinheiros desde os tempos antigos até aos modernos.

No entanto, nos dias actuais Dhruva não estaria satisfeito com a posição da Estrela Polar, tal como das restantes.

A Estrela Polar parece não se mover no céu, por a sua direcção coincidir com a do eixo de rotação da Terra. Enquanto a Terra roda sobre o seu eixo, outras estrelas surgem no horizonte, a Este e põe-se, a Oeste. Mas enquanto o eixo de rotação mantém a sua posição, a Estrela Polar não nasce nem se põe e parece sempre fixa, mantendo-se sempre na mesma direcção. O eixo de rotação da terra, no entanto, muda de direcção muito lentamente. O tempo necessário para uma revolução do eixo de rotação é aproximadamente 26 mil anos. Não admira pois que, durante uma vida humana, ou mesmo alguns séculos, a Estrela Polar dificilmente aparente mover-se. No entanto a sua direcção em relação ao eixo da Terra altera-se lentamente.

Mas este não é o principal problema. A Estrela Polar não está fixa no espaço. Tal como as outras estrelas da nossa Galáxia está a mover-se. Na verdade, a Galáxia, como um todo, roda em torno do seu eixo com um período de

aproximadamente duzentos milhões de anos. Além desta rotação, a nossa Galáxia toma parte numa escala maior de movimento generalizado reconhecido pela expansão do Universo. Assim, Dhruva pode reclamar que ainda não encontrou a sua posição fixa e imutável.

Na realidade, uma análise mais profunda mostra que a mobilidade, mais do que qualquer outra, é a principal característica do Universo. Da mesma forma como os astrónomos estão a descobrir exemplos de movimento em larga escala, também ao estudarmos a física microscópica encontramos exemplos variados de movimento em escalas reduzidas.

Quando olhamos para um rio à distância ele parecerá em repouso. Contudo, quando nos aproximamos começamos a ver fluir a água. Num dia sereno, podemos imaginar o ar em repouso. A Física microscópica, no entanto, diz-nos que o ar é constituído por moléculas em constante movimento, variando este com a temperatura. Quanto maior for o movimento maior será a temperatura. Descendo ao nível atómico, continuamos a encontrar diferentes tipos de movimento, nas diferentes formas da matéria. Nos cristais encontramos as vibrações, os electrões a moverem-se livres nos metais, as transições electrónicas entre os diferentes níveis de energia. Mesmo no interior do núcleo, as partículas não estão em repouso. Assim, pode-se levantar a questão "Porque é que as coisas se movem?"

5.2.1 De Aristóteles a Galileu

Esta questão foi colocada à cerca de vinte e três séculos atrás por Aristóteles, um filósofo grego, discípulo de Platão e tutor de Alexandre o grande. A filosofia aristotélica dominou durante a Idade Média e a sua ciência teve a autoridade da igreja Católica Romana. Actualmente, vivemos na Idade da Ciência, achamos as ideias de Aristóteles estranhas e difíceis de compreender. Contudo, se as virmos como pano de fundo a Grécia em 350 a.C., elas reflectem uma atitude de reflexão sistemática.

Aristóteles descreveu as mudanças num sistema geral, e para ele o movimento significava uma alteração local. As observações diárias apresentam diversos exemplos – o movimento das estrelas através do céu, as colunas de fumo, a chuva a cair, as correntes no mar, as flechas, etc.. Aristóteles sistematizou as suas observações analisando os exemplos naturais de movimento em termos de

combinação de movimentos rectos e circulares. Porque é que as coisas se movem foi respondido por Aristóteles como sendo a tendência natural de cada corpo por determinadas posições, e as observações da natureza mostram os corpos a moverem-se para essas suas posições preferidas.

Aristóteles no entanto distinguiu o movimento natural do movimento violento, causado por agentes externos. Um desses exemplos é o lançamento de uma flecha pelo homem, que é um movimento violento e não natural. Para todo o tipo de movimento violento tem de existir uma causa.

Até ao século dezassete não ocorreram mudanças sérias nas ideias propostas por Aristóteles. O homem que as introduziu foi Galileu Galilei, matemático e filósofo do duque de Florença. Galileu utilizou as experiências demonstrativas para suportar os seus argumentos. Galileu defendeu o sistema de Copérnico e atacou as bases fundamentais da filosofia aristotélica.

5.3 Porque se movem e não caem os astros?

Se observarmos o movimento dos astros, verificamos que todos eles se movem. Durante o dia, o Sol cruza o céu de Este para Oeste; à noite temos as estrelas que, se repararmos bem, apesar de não se moverem umas em relação ás outras, movem-se em conjunto, na sua maioria no sentido de Este para Oeste, como o Sol. A Lua, por sua vez, move-se aproximadamente como as estrelas, mas se repararmos bem, também em relação a elas. Se observarmos ainda o céu nocturno, vemos alguns objectos que se movem em relação às estrelas. Uns relativamente rápido, são os satélites artificiais, uns pouco brilhantes, muito lentamente, são os planetas.

Os antigos gregos acreditavam que o Universo tinha a Terra imóvel no seu centro e o Sol, a Lua e os planetas girando em torno dela. Para explicar estes movimentos criou-se a chamada teoria geocêntrica, que compunha o Universo de várias esferas com a Terra no centro, e os planetas presos a cada uma delas. Esta teoria desenvolveu-se mais com Ptolomeu e foi aceite durante toda a Idade Média, com algumas alterações motivadas pela tradição religiosa cristã.

Em meados do século XVI, a ideia básica de que a Terra era o centro do Universo, ou seja, o centro em torno do qual giravam os planetas, começou a ser colocada em dúvida. Isto deveu-se ao aparecimento da teoria heliocêntrica

de Nicolau Copérnico, segundo a qual os planetas e a Terra giravam em torno do Sol.

No meio do debate, Tycho Brahe apareceu com uma ideia revolucionária para a época. Sugeriu que a questão poderia ser resolvida medindo-se com precisão, as posições reais dos planetas no céu. Construiu então o primeiro observatório astronómico da Europa, e passou anos a medir as posições dos planetas e compilando cuidadosamente estes dados em tabelas volumosas. Com estas observações, no inicio do século XVI, Kepler descobriu as leis que descrevem os movimentos dos planetas.

Kepler descobriu que as órbitas planetárias não são círculos, mas elipses e descreveu o movimento planetário através de três leis:

1ª Lei: Lei das órbitas elípticas (1609) - A trajectória de cada planeta é um elipse, com o Sol num dos focos. Como consequência da órbita ser elíptica, a distância do Sol ao planeta varia ao longo da sua órbita.

2ª Lei: Lei da áreas (1609) – A linha recta que une o Sol ao planeta varre áreas iguais em intervalos de tempo iguais. O significado físico desta lei é que a velocidade orbital não é uniforme, mas varia de uma forma regular: quanto mais distante o planeta está do Sol, mais devagar se move

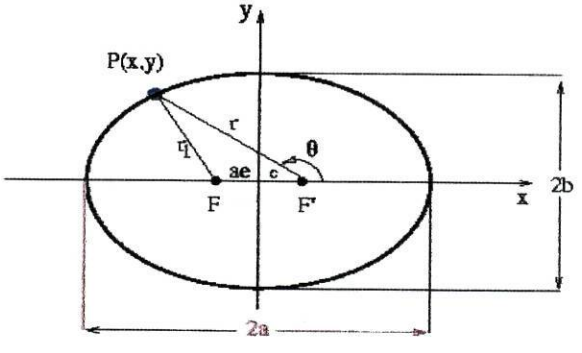


Figura 5.1 – Representação da área da elipse

3ª Lei: Lei harmónica (1618) – O quadrado do período orbital dos planetas é directamente proporcional ao cubo do semi-eixo maior da sua órbita. Esta lei estabelece que planetas com órbitas maiores se movem mais lentamente em torno do Sol, e portanto a força entre o Sol e o planeta diminui com a distância ao Sol. Sendo *P* o período sideral do planeta, *a* o semi-eixo maior da órbita, que é igual á distância média do planeta ao Sol e sendo *K* uma constante, podemos expressar a 3ª lei como:

$$P = Ka^3$$

Se medirmos P em anos (o período sideral da Terra), e a em unidades astronómicas (a distância média da Terra ao Sol), então K=1, e podemos escrever a 3ª lei como:

$$P^2 = a^3$$

As leis de Kepler não se aplicam somente aos planetas que orbitam o Sol, mas a todos os casos em que um corpo celestial orbita outro sob a influência da gravitação –luas que orbitam planetas, satélites artificiais que orbitam a Terra ou outros corpos do Sistema Solar, mesmo estrelas que orbitam outras estrelas.

Com estas leis ficou claro que a Terra não poderia ser o centro do Universo.

Conhecidas as órbitas dos planetas, uma questão se punha naturalmente: O que mantinha os planetas movendo-se e porque não caiam, agora, no Sol?

No modelo geocêntrico de esferas, a questão da queda estava resolvida pois os astros estavam presos nas esferas. Os seus movimentos podiam ser explicados pelos movimentos das esferas, ainda que a causa destes movimentos não estivesse muito clara.



Figura 5.2 – Modelo geocêntrico

Retirada de http://pcastro7.if.ufrgs.br/index.htm

No inicio do século XVII, Galileu procurou entender o movimento dos corpos, usando um novo procedimento que revolucionou o conhecimento e que ficou conhecido como o método científico. Ele começou a procurar as leis da natureza fazendo experiências que eram uma reprodução controlada dos fenómenos que queria entender. Estas experiências são bem simples e podem facilmente ser reproduzidas.

Uma primeira experiência visou determinar qual é o movimento natural dos corpos. Pode-se resumir o problema na seguinte questão: Qual é o movimento de um corpo quando não está actuado por nenhuma força?

Das experiências realizadas com bolas em planos horizontais e lisos, Galileu concluiu que: os corpos que não estão actuados por nenhuma força seguem uma trajectória rectilínea e a sua velocidade mantém-se constante indefinidamente.

Em particular, um corpo inicialmente em repouso tem velocidade nula e portanto a sua velocidade permanecerá nula, ou seja ele permanecerá em repouso. Esta lei é conhecida actualmente como Lei da Inércia.

A questão seguinte que Galileu colocou foi: Se um corpo não modifica a sua velocidade quando não está sujeito a nenhuma força, o que ocorre com a sua velocidade quando ele esta sujeito a uma força?

Para responder a esta questão Galileu utilizou os planos inclinados e usou molas para medir as forças. Concluiu que: As forças fazem com que a velocidade de um corpo se modifique, ou seja, a força determina a variação da velocidade, ou seja, a sua aceleração.

No entanto, após responder a estas questões, ainda não temos explicação para o movimento dos astros e porque não ocorre a sua queda. Assim, e supondo que todos os corpos existentes, quer no céu ou na Terra, estão sujeitos ás mesmas leis do movimento, pelos resultados a que Galileu chegou teríamos duas possibilidades. Ou os astros deveriam cair no Sol, ou, admitindo que não sofrem a acção de nenhuma força, deveriam ter trajectórias rectilíneas e portanto estar-se a afastar indefinidamente do Sol e, consequentemente, também da Terra. Para resolver esta questão, Galileu continuou a efectuar experiências simples.

Assim, estudando a queda dos corpos verificou que: corpos com pesos diferentes caem com velocidades iguais (desprezando a acção do ar); mais ainda, a velocidade de queda é independente da velocidade horizontal dos corpos. Temos assim a condição que permite entender o que é uma órbita. Respeitando a independência entre os movimentos de queda e horizontal, e lembrando que a velocidade horizontal se mantém, pode-se analisar o que acontece com o lançamento horizontal e vertical de uma bola, com diferentes velocidades. Dessa análise verifica-se que as velocidades horizontal e vertical

não dependem do corpo. As leis de queda e movimento linear não dependem do corpo, mas apenas da sua velocidade.

O movimento da Terra em volta do Sol é praticamente circular e não rectilíneo. Assim, deve ser explicado por uma força. A força entre a Terra e o Sol é uma força à distância, de certo modo semelhante à força de um íman sobre um clip ou à força de um balão esfregado numa camisola de lã sobre um pedacinho de papel.

Isaac **Newton** (1642 - 1727), estabeleceu as leis da dinâmica e a lei da gravitação universal, conseguindo explicar cientificamente as leis de Kepler. Fez uma grande síntese dos estudos anteriores do movimento, formulando um conjunto de quatro leis que permitem, em principio, descrever os movimentos do Universo. Essas leis são: inércia, gravitação, acção reacção e a proporcionalidade entre a força e a aceleração.

5.4 Lei da gravitação universal

A força gravitacional traduz uma interacção à distância. Uma pedra largada na Terra é puxada para a Terra devido à força gravítica ou peso que actua sobre ela. Mas o mesmo acontece com a Lua!

Conta a lenda que Newton percebeu um dia, quando estava debaixo de uma macieira e uma maçã lhe caiu na cabeça, que a força que fazia cair a maçã era do mesmo tipo da força que puxava a Lua para a Terra. Newton descobriu, portanto, que a força gravítica não existe apenas à superfície da Terra: existe em todo o lado do universo, pelo que se diz **universal**. Assim, a Lua está sujeita à força gravítica da Terra e é puxada para a Terra do mesmo modo que uma maçã. A Lua é como uma maçã, apesar de maior... Do mesmo modo, a Terra está sujeita à força gravítica do Sol. E o Sol está sujeito à força gravítica das pesadas estrelas no centro da Galáxia. A força de gravitação, como é universal, também existe fora da nossa Galáxia. A Nuvem Grande de Magalhães é atraída pela nossa Galáxia e a nossa Galáxia é atraída pela Andrómeda.

Por que é que a Lua não cai para a Terra tal qual uma pedra? Por que é que a Terra não cai para o Sol? E por que é que o Sol não cai para o centro da Galáxia?

É que o movimento tem de obedecer à força mas *não* tem de seguir a força! Repare-se numa pedra que se atira ao ar. A pedra começa por subir, apesar da

força gravítica ser vertical e para baixo. Se ignorarmos a força de resistência do ar, a única força actuante é a força gravítica, sempre praticamente constante, a apontar para o centro da Terra. A pedra sobe em virtude das condições com que foi lançada. A certa altura, a pedra inverte o sentido da sua velocidade e começa a descer, caindo cada vez mais depressa. Ou repare-se numa pedra enviada obliquamente para o ar: a pedra segue uma linha curva, apesar da força gravítica ser sempre para baixo. Também neste caso, se ignorarmos a força de resistência do ar, a força gravítica é sempre constante, mas a pedra sobe em virtude das condições com que foi lançada.

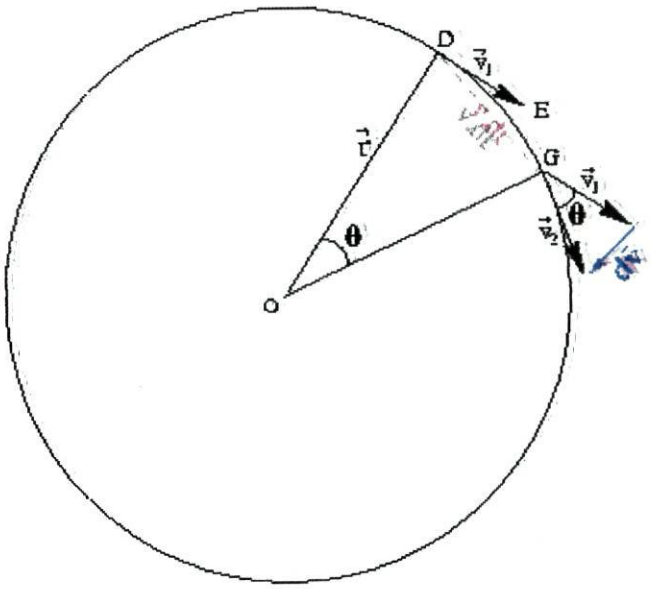
A Terra e a Lua têm movimentos circulares devido ao que chamamos **condições iniciais**: quando se formou o Sistema Solar, há cerca de 4 500 milhões de anos, a Terra ficou a circular em volta do Sol e a Lua ficou a circular em volta da Terra. As velocidades da Terra em volta do Sol e da Lua em volta da Terra eram já nessa altura como são hoje: mantêm o seu valor aproximadamente mas mudam permanentemente de direcção. A velocidade é sempre tangente à trajectória. A força gravitacional, que aponta sempre para o centro da órbita, mantém tal situação. Assim tem sido e assim continuará a ser... Se a força gravitacional cessasse de repente, a Lua sairia disparada da sua órbita caminhando para a frente, em linha recta, com a mesma velocidade que tinha no momento em que a força acabasse. Do mesmo modo, a Terra sairia disparada da sua órbita. E o Sol sairia da sua órbita em torno do centro da Galáxia. Sem forças gravíticas, os astros ficariam todos com movimento rectilíneo e uniforme.

Newton explicou o movimento dos planetas em torno do Sol, assumindo a hipótese de uma força dirigida ao Sol, que produz uma aceleração que obriga a velocidade do planeta a mudar de direcção continuamente. Newton descobriu a Lei da Gravitação Universal considerando o movimento da Lua em torno da Terra e as leis de Kepler.

O holandês Christiaan Huygens (1629-1695), em 1673 e, independentemente, Newton, em 1665 (mas publicado apenas em 1687, no *Principia*), descreveram a aceleração centrípeta nos movimentos circulares.

Consideremos uma partícula que se move num círculo. No instante t a partícula está em D, com velocidade $\vec{v}_1$ na direcção DE. Pela 1ª lei de Newton, se não

existe uma força agindo sobre o corpo, ele continuará em movimento na direcção DE. Após , o ponto está em G, e percorreu a distância $v \times \Delta t$, onde $v = |\vec{v}_1|$ e tem velocidade $\vec{v}_2$, com o mesmo módulo v, mas com outra direcção.



$$\nabla t = dt$$

$$\nabla v = |d\vec{v}|$$

Seja θ o ângulo entre o ponto D e o ponto G. θ também é o ângulo entre $\vec{v}_1$ e $\vec{v}_2$:

$$\theta = \frac{v\Delta t}{r} = \frac{\Delta v}{v},$$

e portanto: $a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v^2}{r}$

Se a partícula tem massa *m*, a intensidade da força central necessária para produzir a aceleração é:

$$|\vec{F}| = m\frac{v^2}{r}$$

Claramente a dedução é válida se Δv e Δt são extremamente pequenos. Este é um exemplo da aplicação do cálculo diferencial, que foi desenvolvido pela primeira vez por Newton.

A Terra exerce uma atracção sobre os objectos que estão à sua superfície. Newton deu conta de que esta força, que se estendia até a Lua, produzia a aceleração centrípeta necessária para manter a Lua em órbita. O mesmo acontece com o Sol e os planetas. Então Newton levantou a hipótese da

existência de uma força de atracção universal entre os corpos em qualquer parte do Universo.

A força centrípeta que o Sol exerce sobre um planeta de massa *m*, que se move com velocidade *v* a uma distância *r* do Sol, em módulo:

$$F = m\frac{v^2}{r} \qquad (F_c)$$

Assumindo neste instante uma órbita circular, que mais tarde será generalizada para qualquer tipo de órbita, o período *P* do planeta é dado por: $P^2 = kr^3$, pela 3ª Lei de Kepler, onde a constante *k* depende das unidades de *P* e *r*. Temos então que

$$v^2 = \frac{4\pi^2 r^2}{kr^3} = \frac{4\pi^2}{kr} \Rightarrow v^2 \propto \frac{1}{r}.$$

Seja *m* a massa do planeta e *M* a massa do Sol. Substituindo-se esta velocidade na expressão da força centrípeta exercida pelo Sol (F_c) no planeta, a força pode então ser escrita como: $F \propto \frac{m}{r^2}$ e, de acordo com a 3ª. lei de Newton, o planeta exerce uma força igual e contrária sobre o Sol. A força centrípeta exercida pelo planeta sobre o Sol, de massa *M* é dada por: $F \propto \frac{M}{r^2}$ Newton deduziu então que:

$$F = \frac{GMm}{r^2}$$

onde G é uma constante de proporcionalidade. Tanto o Sol quanto o planeta que se move em torno dele experimentam a mesma força, mas o Sol permanece aproximadamente no centro do Sistema Solar porque a massa do Sol é aproximadamente mil vezes maior que a massa de todos os planetas somados.

Newton concluiu então que para que a atracção universal seja correcta, deve existir uma força atractiva entre pares de objectos em qualquer região do universo, e esta força deve ser proporcional ás suas massas e inversamente proporcional ao quadrado das suas distâncias. A constante de proporcionalidade G depende apenas das unidades em que se exprimem as massas e a distância.

5. 4.1 A "Constante" k

Suponha que dois corpos de massas m_1 e m_2 estão separados do centro de massa por distâncias r_1 e r_2.

A atracção gravitacional é dada por: $F_G = \frac{Gm_1m_2}{(r_1+r_2)^2}$, e a aceleração centrípeta por:

$$F_1 = \frac{m_1v_1^2}{r_1} \quad \text{e} \quad F_2 = \frac{m_2v_2^2}{r_2}$$

Como:

$$v_1 = \frac{2\pi r_1}{P} \Rightarrow v_1^2 = \frac{4\pi^2 r_1^2}{P^2},$$

$$v_2 = \frac{2\pi r_2}{P} \Rightarrow v_2^2 = \frac{4\pi^2 r_2^2}{P^2}$$

$$F_1 = F_2 = F_G$$

$$F_1 = \frac{Gm_1m_2}{(r_1+r_2)^2}$$

$$F_1 = \frac{m_1v_1^2}{r_1}$$

$$F_1 = \frac{4\pi^2 m_1 r_1}{P^2}$$

e

$$F_2 = \frac{Gm_1m_2}{(r_1+r_2)^2}$$

$$F_2 = \frac{m_2\upsilon_2^2}{r_2}$$

$$F_2 = \frac{4\pi^2 m_2 r_2}{P^2}$$

Eliminando-se m_1 na primeira equação de F_1 e m_2 na primeira equação de F_2, e somando-se, obtemos:

$$\frac{G(m_1+m_2)}{(r_1+r_2)^2} = \frac{4\pi^2(r_1+r_2)}{P^2}, \text{ ou } P^2 = \frac{4\pi^2}{G(m_1+m_2)}(r_1+r_2)^3$$

Identificando-se $\mathbf{a=(r_1+r_2)}$, obtemos: $K = \frac{4\pi^2}{G(m_1+m_2)}$

A constante G é a mesma em todo o universo e em todas as ocasiões, chamando-se por isso *constante de gravitação universal*, e toma o valor $6,67x10^{-11}N.m^2Kg^{-2}$.

5.5 Peso e massa de um corpo

Em vez da Lua, que é puxada pela Terra, vejamos em mais pormenor o caso, bem mais simples e próximo de nós, de uma pedra, também puxada para a Terra. Tanto num caso como no outro, a força gravítica tem a direcção da linha que liga a pedra ao centro da Terra, ou a Lua ao centro da Terra. Nos dois casos aponta para o centro da Terra. Dizemos que um corpo é mais pesado do que outro se a força com que a Terra o atrai no mesmo lugar for maior. De acordo com a equação escrita anteriormente, que exprime a lei de gravitação universal, o valor da força gravítica ou peso de uma pedra à superfície da Terra é

$$P = G.\frac{M.m}{R^2}$$

onde M é a massa da Terra, m é a massa da pedra e $d=R$ é o raio da Terra, isto é, a distância aproximada da pedra ao centro da Terra .

Se escrevermos, $g = \frac{GM}{R^2}$ vem simplesmente que o peso é dado por

$$P = m\,g.$$

O peso é *directamente proporcional* à massa. A constante g é chamada *aceleração da gravidade* na Terra.

Como $g = \frac{P}{m}$ esta constante é o peso por unidade de massa. Podemos calcular o valor de g a partir da constante de gravitação universal, do raio da Terra e da massa da Terra. O resultado é

$$g = \frac{6,67x10^{-11}x6,0x10^{24}}{\left(6,4x10^{6}\right)^2} = 9,8N/Kg$$

Como depende de propriedades do planeta Terra, a aceleração da gravidade *não* é uma constante universal. O valor de g é, portanto, característico do planeta Terra, ao contrário de G. À superfície de outros satélites, planetas ou estrelas a constante de proporcionalidade entre peso e massa é diferente, pois a massa e o raio dos vários astros são diferentes dos da Terra. Por exemplo, na

Lua a força gravítica exercida sobre um objecto (ou peso) é seis vezes menor do que na Terra, pelo que lá os astronautas conseguem dar grandes passadas e mesmo dar saltos com relativa facilidade.

O peso na Terra é dirigido para o centro da Terra, ao longo de uma linha chamada **vertical** do lugar. Essa direcção pode, pois, ser identificada pelo fio de prumo, um objecto pendurado de um fio, que é usado pelos pedreiros para construir paredes verticais. Ao longo dessa linha distinguem-se o sentido para cima, para o céu, e para baixo, para o centro da Terra. O significado de "em cima" e "em baixo" depende, como dissemos, do ponto da Terra onde estamos colocados, de modo que a força gravitacional aponta para baixo tanto para nós como para os habitantes da Terra nos antípodas de nós (as pessoas do outro lado da Terra; a palavra antípoda significa com os pés em posição oposta).

O plano perpendicular à vertical é o plano horizontal ou plano do horizonte, que é tangente à Terra num dado lugar. A superfície da água parada indica esse plano.

Todos os corpos à superfície da Terra têm peso, porque todos eles são atraídos, com maior ou menor intensidade, pela Terra. Mas, se estão sujeitos a essa força, porque é que não têm todos um movimento acelerado no sentido para baixo? Alguns corpos estão imóveis porque outra força se opõe ao respectivo peso. Por exemplo, uma pessoa de pé no chão está sujeita a uma força, exercida pelo chão, que *equilibra* o seu peso. Outro exemplo: uma pedra pousada sobre uma mesa está sujeita a uma força, exercida pela mesa, que equilibra o peso da pedra (senão a pedra entrava *mesmo* para dentro da mesa!). A resultante das duas forças é nula.

A força de atracção universal existe entre quaisquer dois objectos, não sendo necessário que um deles seja um planeta. Por exemplo, entre uma pedra em cima de uma mesa e uma pessoa próxima há uma força gravitacional. Mas essa força é muito pequena comparada com a força gravitacional que a Terra exerce sobre a pessoa ou sobre a pedra, porque a Terra tem uma massa muito maior do que a pessoa ou a pedra. As forças gravitacionais entre objectos pequenos não têm efeitos visíveis. Mesmo a força entre corpos grandes mas muito distantes, como Júpiter e Saturno, e a Terra é desprezável quando comparada com a força entre a Terra e Sol.

A massa de um corpo é uma grandeza física (símbolo *m*) que caracteriza esse corpo. Quanto mais massa tem um corpo, mais difícil é movê-lo.

O valor do peso é proporcional à massa, mas peso e massa são grandezas físicas distintas! No dia-a-dia as duas grandezas confundem-se: por exemplo, uma pessoa pesa-se numa balança e diz que "pesa 70 kg". Mas, de facto, 70 kg é o valor da sua massa; o peso vale 70 x 9,8 = 700 N. Em Física é importante a distinção entre peso e massa. O peso é uma força – um vector - que depende do sítio onde está o objecto (o peso é seis vezes menor na Lua do que na Terra) mas a massa é uma propriedade do objecto que tem sempre o mesmo valor onde quer que o objecto se encontre (a massa é a mesma na Terra e na Lua).

Todas as grandezas físicas se podem medir e o peso não é excepção. Para determinar o peso de um corpo, podemos usar uma balança. Mas um dinamómetro é um medidor de forças e permite também medir o peso de um objecto pequeno.

Sabendo o peso *P* e a aceleração da gravidade *g* ficamos a saber a massa. Resolvemos em ordem a *m* a equação $P = m\,g$, vindo:

$$m = \frac{P}{g}$$

Normalmente um objecto com maior tamanho tem mais peso e, portanto, mais massa. Mas nem sempre é assim! Conhecemos da Química a noção de densidade. Por exemplo: qual pesa mais, um quilograma de algodão ou de ferro? Pesam o *mesmo*! Mas o ferro ocupa menos espaço porque é mais denso.

Todos os corpos têm massa e, se estiverem perto ou longe de um planeta (ou mesmo estrela), têm também peso uma vez que são atraídos por ele. Vemos na televisão imagens de astronautas a bordo de uma nave em órbita da Terra, onde eles aparecem a flutuar, como se não tivessem peso. É a situação chamada "falta de peso" ou imponderabilidade. Porém, este nome engana... uma vez que os astronautas têm peso: são atraídos para a Terra, tal qual a nave onde se situam (astronautas e nave têm movimento circular, com a força apontar para o centro da órbita). O peso é apenas um pouco menor do que na Terra.

Na verdade a massa de um corpo permanece constante, uma vez que o número de corpúsculos que o constitui não é alterado quando é levado de um local para o outro. No entanto, o peso – força com que o corpo é atraído para o planeta ou

satélites nas proximidades do qual se encontra, varia, não só com a altitude mas, também, com a latitude.

Para um dado corpo à superfície da Terra, quanto maior for a altitude a que se encontra, maior é a distância ao centro da Terra (d); assim, menor será a força gravítica, peso do corpo.

$$\text{Maior altitude} \Rightarrow \text{Maior d} \Rightarrow \text{Menor peso}$$

Por outro lado devido ao movimento de rotação, a Terra é ligeiramente achatada nos pólos. Assim, quando um corpo é levado do equador terrestre para um dos pólos, a distância ao centro do nosso planeta vai diminuindo, pelo que a força gravítica vai aumentando.

$$\text{Maior latitude} \Rightarrow \text{Menor d} \Rightarrow \text{Maior peso}$$

Quando um corpo é levado para fora do planeta também o peso vai variar, dependendo das características de onde for calculado.

Mas estas diferenças nas "forças exercidas" salientam-se mais se compararmos aquelas que diferentes planetas ou luas do Sistema Solar exercem sobre nós, que estamos na Terra. A força maior é exercida pela Terra, de seguida pela Lua, e depois, por ordem decrescente, e com valores muito menores, pelo Sol, Júpiter, Vénus e Saturno.

5.6 Peso e força gravítica

Até agora temos desprezado o movimento de rotação da Terra. No entanto, sabemos que se tivermos, nas proximidades da Terra, um corpo suspenso por um fio e se em determinado instante cortarmos esse fio, um observador ligado à Terra não vê o corpo cair na direcção que contém o centro desta.

A explicação está no facto de a Terra não ser um referencial inércial relativamente a três estrelas "fixas".

Com efeito:

$$\vec{a}_{corpo/Terra} = \vec{a}_{corpo/Estrelas} - \vec{a}_{Terra/Estrelas}$$

Como consequência teremos, multiplicando esta expressão pela massa do corpo:

$$m_c\vec{a}_{corpo/Terra} = m_c\vec{a}_{corpo/Estrelas} - m_c\vec{a}_{Terra/Estrelas}$$

Mas:

$m_c\vec{a}_{corpo/Terra}$ - é a força resultante sobre o corpo para o observador ligado à Terra.

$m_c\vec{a}_{corpo/Estrelas}$ - é a força resultante sobre o corpo para o referencial inercial – força gravítica.

$m_c\vec{a}_{Terra/Estrelas}$ - é uma força com sentido contrário à aceleração centrípeta do lugar da Terra onde se encontra o observador.

Devido à sua orientação, a esta força ($-m_c\vec{a}_{Terra/Estrelas}$) é comum chamar-se força centrífuga ($\vec{F}_{cf}$) e existe para todos os referenciais não inerciais com movimento curvilíneo.

Podemos então concluir que para um observador no referencial ligado à Terra o movimento do corpo pode ser descrito pela soma de duas forças – a força gravítica e a força centrífuga.

À resultante destas duas forças é chamado peso.

$$\vec{P} = \vec{F}_g + \vec{F}_{cf}$$

Nos pólos $\vec{a}_c = \vec{0}$ logo, $\vec{F}_{cf} = \vec{0}$ e virá $\vec{P} = \vec{F}_g$

Se ignorarmos a rotação da Terra, teremos , também: $\vec{a}_c = \vec{0}$ e haverá coincidência entre o peso do corpo e a força gravítica $\vec{P} = \vec{F}_g$.

5.7 Massa gravítica e massa inercial

Analisando a lei da gravitação universal é fácil concluir que as forças gravíticas dependem de uma propriedade dos corpos a que se chama massa gravítica.

Com efeito, se designarmos por $|\vec{F}_1|$ e $|\vec{F}_2|$ os valores das forças com que a Terra atrai dois corpos, de massas m_1 e m_2, colocados a igual distância dela, teremos

$$|\vec{F}_1| = G\frac{M_T m_1}{r^2} = Km_1$$

e

$$|\vec{F}_2| = G\frac{M_T m_2}{r^2} = Km_2$$

Donde:

$$\frac{|\vec{F}_1|}{|\vec{F}_2|} = \frac{m_1}{m_2}$$

E, se atribuirmos o valor unitário a uma das massas, poderemos determinar o valor da outra, através da razão entre os valores das forças que a Terra exerce sobre elas.

Assim, a massa gravítica é uma propriedade do corpo, responsável pelo maior ou menor valor da força gravítica a que ele está sujeito.

Sabemos, no entanto, que dois corpos, de massas m_1 e m_2, apoiados num plano horizontal, liso, adquirirão a mesma aceleração, se submetidas a forças $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$, tais que:

$$|\vec{F}_1| = m_1|\vec{a}|$$

e

$$|\vec{F}_2| = m_2|\vec{a}|$$

Também neste caso, a razão entre os valores das forças é igual à razão entre as massas:

$$\frac{|\vec{F}_1|}{|\vec{F}_2|} = \frac{m_1}{m_2}$$

No entanto, m_1 e m_2 nada têm a ver com a massa gravítica, pois não estamos a tratar de forças gravíticas.

Elas medem a inércia dos corpos, uma vez que o valor da força necessária para produzir determinada aceleração será tanto maior quanto maior for a massa. Concluindo, a entidade m, que surge na relação $\vec{F} = m\vec{a}$, é uma medida da inércia do corpo e é designada por massa inércial. Pode concluir-se assim, que estas massas são de naturezas diferentes. No entanto, a experiência prova que com uma aproximação de uma parte em 10^{12} elas são idênticas (principio da equivalência).

O valor atribuído à constante de gravitação universal, e as suas unidades, são uma consequência desta identidade.

5.8 Forças Gravitacionais Diferenciais

Corpos com simetria esférica agem, gravitacionalmente, como massas pontuais, para as quais as influências gravitacionais são facilmente calculadas. Na natureza, no entanto, os corpos na maioria das vezes não são perfeitamente esféricos. A principal contribuição para a não esfericidade dos planetas vem da sua *rotação*. Outra contribuição é proporcionada pelas forças gravitacionais diferenciais que corpos vizinhos exercem uns nos outros. Essas forças diferenciais, resultam em fenómenos como *marés* e *precessão*.

A *força gravitacional diferencial* é a diferença entre as forças gravitacionais exercidas em duas partículas vizinhas por um terceiro corpo, mais distante. A figura abaixo ilustra a força diferencial entre as partículas, devido à atracção gravitacional do corpo *M*.

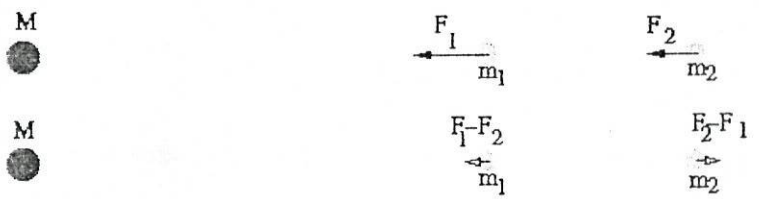
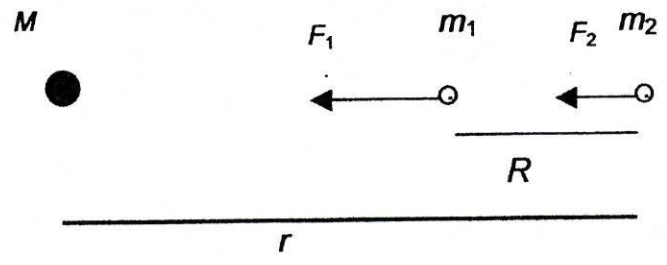


Figura 5.3 – Representação da maré

A força diferencial $\Delta\vec{F} = \vec{F}_1 - \vec{F}_2$ tende a **separar** as duas partículas m_1 e m_2 pois, em relação ao centro de massa, as duas afastam-se, como se vê na parte inferior da figura. Se as duas partículas são parte do mesmo corpo, a força diferencial tende a alongá-lo ou mesmo rompê-lo.

5.8.1 Derivação da força diferencial



Considere as duas partículas da figura anterior, sendo R a distância entre as duas partículas, e r a distância de M à partícula m_2. O valor de ΔF será: $\Delta F = F_1 - F_2$. Sendo $F_1 = \frac{GMm_1}{(r-R)^2}$ e $F_2 = \frac{GMm_2}{r^2}$.

Temos que:

$$F_1 - F_2 = GM\left[\frac{m_1}{(r-R)^2} - \frac{m_2}{r^2}\right]$$

Fazendo $m_1 = m_2 = m$, podemos escrever:

$$F_1 - F_2 = GMm\left[\frac{r^2-(r-R)^2}{r^2(r-R)^2}\right] = GMm\left(\frac{2rR-R^2}{r^4-2Rr^3+r^2R^2}\right) = GMmR\left[\frac{2r-R}{r^4\left(1-\frac{2R}{r}+\frac{R^2}{r^2}\right)}\right]$$

Para $r >> R$, $2r\text{-}R \approx 2r$ e $\left(1-\frac{2R}{r}+\frac{R^2}{r^2}\right) \approx 1$

Portanto a expressão da força diferencial para partículas com a mesma massa e muito mais próximas entre si que de um terceiro corpo fica $\Delta F = \frac{2GMm}{r^3}R$

Podemos chegar a esse mesmo resultado derivando a Lei de Gravitação Universal $F = -\frac{GMm}{r^2}$

Então $\frac{dF}{dr} = \frac{2GMm}{r^3}$ e $dF = \frac{2GMm}{r^3}dr$

Esta é a expressão da força diferencial dF na direcção de dr. É basicamente a mesma expressão derivada acima, com a diferença de que aqui temos dr onde acima temos R. Isso nos diz portanto que dr é a separação entre os pontos para os quais estamos calculando a força diferencial.

5.9 Marés

As marés na Terra constituem um fenómeno resultante da atracção gravitacional exercida pela Lua sobre a Terra e, em menor escala, da atracção gravitacional exercida pelo Sol sobre a Terra.

A ideia básica da maré provocada pela Lua, por exemplo, é que a atracção gravitacional sentida por cada ponto da Terra, devido à Lua, depende da distância do ponto em questão à Lua. Portanto, a atracção gravitacional sentida no lado da Terra que está mais próximo da Lua é *maior* do que a sentida no centro da Terra, e a atracção gravitacional sentida no lado da Terra que está mais distante da Lua é *menor* do que a sentida no centro da Terra.

Em relação ao centro da Terra, um lado está a ser puxado na direcção da Lua e o outro lado está a ser puxado na direcção contrária. Como a água flui muito facilmente, ela "empilha-se " nos dois lados da Terra, que fica com um bojo de água na direcção da Lua e outro na direcção contrária.



Figura 5.4 – Representação do bojo da Terra
Retirada de http://pcastro7.if.ufrgs.br/index.htm

Enquanto a Terra gira no seu movimento diário, o bojo de água continua sempre A apontar aproximadamente na direcção da Lua. Num determinado momento, um determinado ponto da Terra estará exactamente na direcção da Lua, na posição mais próxima e terá maré alta. Seis horas mais tarde, a rotação da Terra terá afastado esse ponto da direcção da Lua, e ele terá maré baixa. Dali a mais seis horas, o mesmo ponto terá a mesma direcção da Lua, e terá maré alta

novamente. Portanto as marés acontecem duas vezes a cada 24h 50 min, que é a duração do dia lunar e devido à combinação do período da Lua e da Terra.[5]

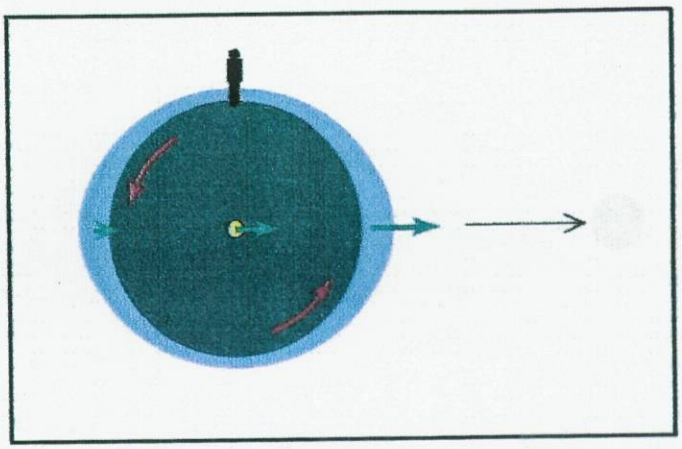


Figura 5.5 – Variação das marés

Retirada de http://pcastro7.if.ufrgs.br/index.htm

Se a Terra fosse totalmente coberta de água, a máxima altura da maré seria 1 m.

Como a Terra não é completamente coberta de água, vários aspectos resultantes da distribuição das massas continentais contribuem para que a altura e a hora da maré variem de um lugar para outro. Em algumas baías e estuários as marés chegam a atingir 10 m de altura.

5.9.1 Expressão da força de maré

Considere a atracção gravitacional F_p , sentida por uma partícula num ponto *P* na superfície da Terra, situado a uma distância *r* da Lua. Seja *d* a distância do centro da Terra ao centro da Lua, e *R* o raio da Terra.

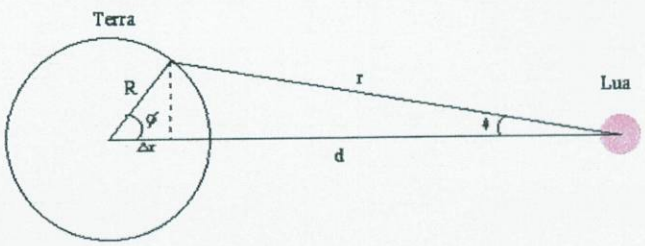


Figura 5.6– Distâncias entre a Terra e a Lua

Retirada de http://pcastro7.if.ufrgs.br/index.htm

[5] Mais informações sobre as marés "Astronomy – Structure of the Universe – 3rd edition, ªE. Roy and D. Clarke.

A força diferencial ΔF no ponto P em relação ao centro da Terra é $\Delta\vec{F} = \vec{F}_P - \vec{F}_c$. Como r é muito maior do que R, o ângulo θ é muito pequeno e a direcção da força $\vec{F}_P$ é quase paralela direcção da força $\vec{F}_c$, portanto pode-se dizer, sem muita perda de precisão, que $\Delta F = F_P - F_c$. O valor de ΔF já foi calculado atrás e vale $\Delta F = \frac{2GMm}{r^3}\Delta r$.

Nesta expressão, M é a massa do corpo que provoca a maré (a Lua no nosso exemplo), m é a massa da partícula teste, r é a distância dos pontos onde se mede a maré ao corpo que cria a maré, (a distância Terra-Lua), e Δr é a distância entre os pontos.

Portanto, a força de maré num corpo de raio R, provocada por um corpo de massa M, localizado a uma distância d, é $\Delta F \alpha \frac{M}{d^3} R$.

A força ΔF pode ser decomposta numa componente vertical à superfície da Terra, e uma componente horizontal. A componente vertical provoca apenas uma leve variação do peso das massas localizadas no ponto onde estamos a calcular a força de maré; é a componente horizontal que provoca a maré propriamente dita.

5.9.2 Comparação das marés produzidas na Terra pela Lua e pelo Sol

Como vimos na equação, a força de maré é directamente proporcional à massa do corpo que provoca a maré e inversamente proporcional ao cubo da distância entre o corpo que provoca a maré e o que sofre a maré. Portanto, embora a massa do Sol seja muito maior do que a da Lua, por ele estar também muito mais distante a maré provocada pelo Sol tem menos da metade do efeito da provocada pela Lua. Mas os efeitos das duas marés combinam-se vectorialmente, de forma que a intensidade da maré resultante depende da posição da Lua. Na Lua Nova ou Lua Cheia, as duas forças somam-se (O Sol, a Terra e a Lua estão alinhados) e produzem as marés cheias mais altas (marés vivas) e marés baixas mais baixas. Na Lua Quarto Crescente ou Minguante (os astros estão em quadratura) os efeitos da maré são atenuados, embora ligeiramente pela acção do Sol.

Se compararmos os módulos d forças de maré produzidas pelo Sol e pela Lua numa partícula de massa m na superfície da Terra obtém-se:

$$\frac{dF\Theta}{dF_L} = \frac{M_\Theta}{M_L}\left(\frac{d_L}{d\Theta}\right)^3$$

$$\frac{dF\Theta}{dF_L} = \frac{2\times10^{30}Kg}{7.35\times10^{22}Kg}\left(\frac{d_L}{d_\Theta}\right)^3 = 0.46 = \frac{1}{2.2}$$

5.9.3 Rotação sincronizada

A força de maré causada numa partícula na Lua, pela Terra, é dada por

$$\Delta F_{(T\to L)} = \frac{2GM_{Terra}m_{partícula}}{d_{L-T}^3}R_L$$

e a força de maré causada numa partícula na Terra, pela Lua, é dada por

$$\Delta F_{(L\to T)} = \frac{2GM_{Lua}m_{partícula}}{d_{L-T}^3}R_T$$

$$dF_{(T\to L)} = \frac{M_{Terra}}{M_{Lua}}\frac{R_{Lua}}{R_{Terra}}dF_{(L\to T)} \approx 20dF_{(L\to T)}$$

Ou seja, a força de maré na Lua, provocada pela Terra, é aproximadamente 20 vezes a força de maré na Terra, provocada pela Lua.

Seja a_L a aceleração gravitacional de uma partícula de massa m na Terra, causada pela Lua. Se considerarmos que a *energia potencial* mgh_L causada pelo deslocamento h_L devido à maré da Lua sobre uma massa m tem que ser equilibrado pela diferença de energia (causada por dF_{L-T}) mda_LR_T, onde $da_L = a_L\frac{2R_T}{d_{TL}}$ e onde g é a aceleração gravitacional da superfície da Terra:

$$g = \frac{GM_T}{R_T^2} \approx 9{,}81N/Kg$$

$a_L = \frac{GM_L}{d_{TL}^2} = 3{,}39\times10^{-6}g$ e obtemos $h_L = 0{,}72m$ e similarmente para a maré do Sol.

Acredita-se que, no passado, o período de rotação da Lua era menor do que o seu período de translação em torno da Terra. Ao girar, ela tentava arrastar consigo os bojos de maré, que sempre ficavam alinhados na direcção da Terra.

Assim, havia um movimento relativo entre as diferentes partes da Lua, o qual gerava atrito, que por sua vez tendia a freiar a rotação. Devido a esse atrito a Lua foi perdendo energia de rotação até ficar com a *rotação sincronizada*, estado em que o período sideral é exactamente igual ao período de revolução.

Não é só a Lua que tem rotação sincronizada; os dois satélites de Marte, Phobos e Deimos, cinco das 16 luas de Júpiter (incluindo os quatro satélites galileanos), 9 das 15 luas de Urano, a lua Tritão de Neptuno, Plutão e Caronte, todos têm rotação sincronizada.

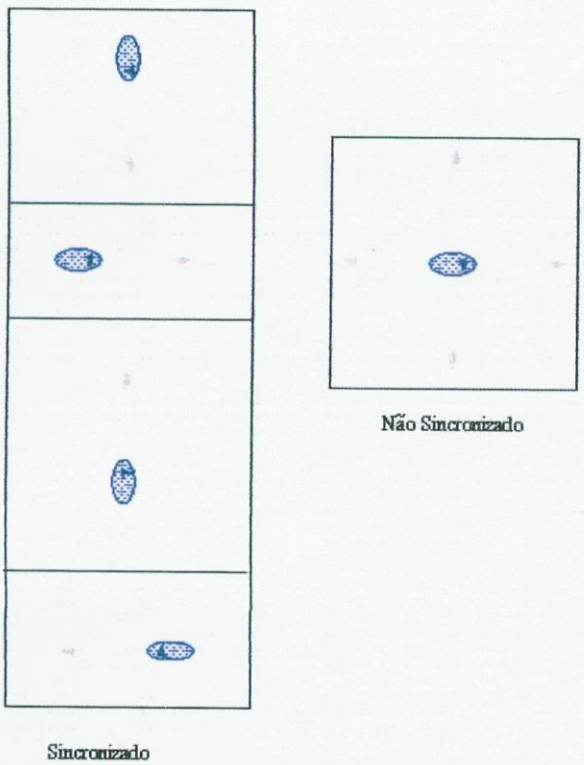


Figura 5.6 – Esquema de rotação: sincronizada e não sincronizada. Na rotação sincronizada vê-se se o corpo a azul, com um ponto a identificar um local, no seu movimento de translação o corpo rosa observa sempre o mesmo ponto do azul. Têm pois um movimento sincronizado No caso da rotação não sincronizada, o corpo rosa está em quatro posições diferentes do movimento de translação e observa posições diferentes do corpo azul
Retirada de http://pcastro7.if.ufrgs.br/index.htm

Na órbita circular e sincronizada não existe movimento relativo. A distorção ainda ocorre, mas há equilíbrio que não envolve qualquer movimento relativo por qualquer parte da matéria.
No estado actual de evolução do sistema Terra-Lua, a Terra ainda tem que girar sob os bojos de maré, que ficam sempre apontados para a Lua. O atrito gerado faz com que a rotação da Terra diminua, aumentando o dia em 0,002 segundos por século.
Se o momento angular de rotação da Terra diminui por fricção, então a Lua tem que aumentar o seu momento angular orbital, movendo-se para mais longe da Terra.

O momento angular de translação da Lua é dado por $\vec{\ell} = m.\vec{r} \times \vec{v}$, onde r é o raio da órbita e v a velocidade orbital. Como $v = 2\pi r/P$ e o período $P^2 = kr^3$, então

$$v = \frac{2\pi r}{k^{1/2} r^{3/2}} = \frac{2\pi}{k^{1/2}} r^{-1/2}, \qquad \ell = m\frac{2\pi}{k^{1/2}} r.r^{-1/2} = m\frac{2\pi}{k^{1/2}} r^{-1/2},$$

ou seja, se se aumentar o raio da órbita r, aumenta-se o momento angular orbital, compensando a redução do momento angular de rotação (spin).

No futuro distante, a dar-se sincronização da órbita da Terra com a Lua, o dia e o mês terão a mesma duração, e este será igual a aproximadamente 50 dias actuais! No passado, a Terra devia girar mais rápido, e portanto o dia devia ser mais curto. De facto, estudos palentológicos indicam que o ano já teve 400 dias, quando o dia tinha 21 horas, e as marés eram muito mais intensas, pois a Lua estava mais próxima. A evidência vem de certas criaturas marinhas cujas conchas têm bandas de crescimento diários e mensais, permitindo que os cientistas contem os números de bandas em um ciclo mensal em fósseis de idades diferentes.

5.9.4 Limite de Roche

Uma consequência das forças de maré é que um satélite em geral não pode chegar muito perto do seu planeta sem se romper. O limite de Roche é a distância mínima ao centro do planeta que um satélite fluído pode chegar sem se tornar instável devido à força de maré.

Em 1850, o astrónomo francês Edouard Roche (1820-1883) demonstrou que, para um *satélite fluído, mantido apenas pela sua auto-gravidade*, de densidade média ρ_m, orbitando em torno de um planeta de densidade média ρ_M, com o raio R, a distância mínima do planeta a que o satélite pode orbitar estavelmente é

$$d = 2.44\left(\frac{\rho_M}{\rho_m}\right)^{1/3} R.$$

Se o planeta e o satélite tiverem densidades iguais, o limite de Roche é 2,44 vezes o raio do planeta.

Uma derivação simples deste limite obtém-se considerando duas partículas de massas m iguais, separadas somente por uma distância dr. A força gravitacional

entre as partículas é dada por $F_G = \frac{Gmm}{(dr)^2}$ e a força de maré, de um corpo de massa *M*, a uma distância *d*, sobre elas será

$$F_M = \frac{2GMmdr}{d^3}.$$

Para as duas partículas permanecerem juntas, a força gravitacional entre elas tem que pelo menos balançar a força de maré, logo o limite é dado pela igualdade

$$\frac{Gmm}{(dr)^2} = \frac{2GMmdr}{d^3},$$

ou seja, $d = \left(\frac{2M}{m}\right)^{1/3} dr$.

Seja $\rho_M = \frac{M}{4/3\,\pi R^3}$ e $\rho_m = \frac{m}{\frac{4}{3}\pi\left(\frac{dr}{2}\right)^3}$.

O raio é $\frac{dr}{2}$, pois as duas partículas de massa m têm distância centro a centro dr. Substituindo-se os valores de ρ_M e ρ_m na equação, obtém-se então:

$$d = (16)^{1/3}\left(\frac{\rho_M}{\rho_m}\right)^{1/3} R = 2.51\left(\frac{\rho_M}{\rho_m}\right)^{1/3} R$$

O valor da constante numérica é 2.51, ao invés de 2.44, porque não levamos em conta que as partículas formam um fluído.

Em 1974, Hans R. Aggarwald e Vern R. Oberbeck estudaram o caso de ruptura por maré de corpos esferoidais sólidos, rochosos ou gelados, mantidos coesos por forças de tensão intrínsecas do seu material. Encontraram que, para satélites desse tipo, com diâmetros maiores do que 40 km, a distância mínima a que eles podem estar do seu planeta sem quebrar é $d = 1.38\left(\frac{\rho_M}{\rho_m}\right)^{1/3} R$.

Para corpos externos, que se aproximem de um planeta, a distância a que eles podem chegar é ainda um pouco menor.

Qual a menor distância que a Lua pode chegar da Terra sem se romper?

Usando $d = 1.38\left(\frac{\rho_M}{\rho_m}\right)^{1/3} R$ e considerando que

$M_{Terra} = 5.97x10^{24}Kg$

$R_{Terra} = 6370\ Km$

$M_{lua} = 7.35x10^{22}\ Kg$

$R_{lua} = 1738\ Km$

Obtemos: $\rho_{Terra} = \frac{M_{Terra}}{\frac{4}{3}\pi R_{Terra}^3} = 5514Kg/m^3$ e $\rho_{Lua} = \frac{M_{Lua}}{\frac{4}{3}\pi R_{Lua}^3} = 3342Kg/m^3$

Portanto $d = 1.38\left(\frac{5514Kg/m^3}{3342Kg/m^3}\right)^{1/3} x6370Km = 7527Km$

Naturalmente, os satélites, ou outros corpos, podem ser quebrados por outras causas, como por tensões aerodinâmicas, dependendo da densidade da atmosfera do planeta.

Enfim, os limites reais de aproximação mínima para os corpos serem estáveis frente a forças de maré dependem do tamanho e da tensão interna dos corpos. Satélites sólidos podem chegar mais perto do planeta do que satélites fluidos, porque as forças de tensão interna das rochas que os constituem os mantêm estáveis. Corpos menores do que 40 km podem chegar ainda mais perto do planeta sem quebrar por forças de maré, desde que eles sejam pequenos e duros o suficiente. Por exemplo, os anéis de Saturno estão dentro do limite de Roche de Saturno, o que significa que as pequenas partículas que formam o anel têm forças coesivas maiores do que as forças de maré. Entretanto, à medida que aumenta o tamanho do corpo, as suas forças coesivas ficam menos importantes comparadas com as forças de maré. Esta é uma explicação provável para o facto das partículas que constituem os anéis de Saturno nunca se terem juntado para formar um satélite. Na realidade, é possível que os anéis de Saturno sejam resultado de um satélite ou cometa que se aproximou demais do planeta e se quebrou devido às forças de maré.

5.10 Precessão do Eixo da Terra

Um outro efeito das forças diferenciais do Sol e da Lua na Terra, é o movimento de *precessão* da Terra.



Figura 5.7 – Movimento de precessão da Terra
Retirada de http://pcastro7.if.ufrgs.br/index.htm

O que causa a precessão?

A Terra não é perfeitamente esférica, mas sim achatada nos pólos e bojuda no equador. O seu diâmetro equatorial é cerca de 40 km maior do que o diâmetro polar. Além disso, o plano do equador terrestre, e portanto o plano do bojo equatorial, está inclinado 23° 26' 21,418" em relação ao plano da eclíptica[6], que por sua vez está inclinado 5° 8' em relação ao plano da órbita da Lua. Por causa disso, as forças diferenciais (que ficam mais importantes nos dois bojos da Terra) tendem, não apenas a achatá-la ainda mais, mas também a "endireitar" o seu eixo, alinhando-o com o eixo da eclíptica.

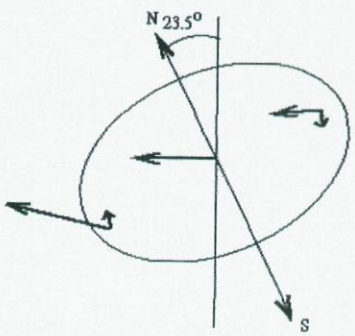


Figura 5.8 – Direcção dos eixos durante a precessão

O eixo da Terra não se alinha com o eixo da eclíptica, mas *precessiona* em torno dele, da mesma forma que um pião posto a girar precessiona em torno do eixo vertical ao solo.

---

[6] Linha que representa o movimento aparente do Sol ao longo do ano.

No caso do pião, o seu peso gera um torque $\vec{N} = \vec{r} \times m\vec{g}$ onde $\vec{r}$ é o vector posição do centro de massa do pião em relação ao ponto de contacto com o solo, e $m\vec{g}$ é a força peso. Portanto o torque $\vec{N}$ é paralelo ao solo, perpendicular à força peso, e perpendicular ao momentum angular de rotação do pião. Em módulo, o seu valor é $N=mgr$. Como o torque é dado por $\vec{N} = \frac{d\vec{L}}{dt}$ o seu efeito é variar o momentum angular do pião. Essa variação é expressa por $d\vec{L} = \vec{N}dt$ ou seja, tem a mesma direcção de $\vec{N}$.

Como $\vec{L}$ e $\vec{N}$ são perpendiculares, o torque não altera o módulo de $\vec{L}$, mas apenas a sua direcção, fazendo-o precessionar em torno do eixo perpendicular ao solo.

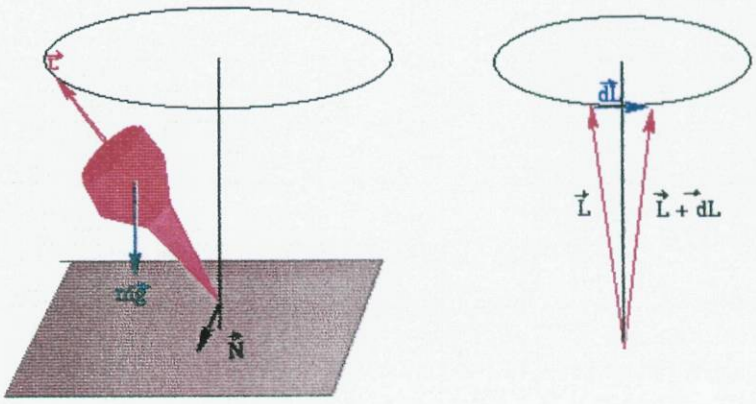


Figura 5.9 – Precessão de um pião

Retirada de http://pcastro7.if.ufrgs.br/index.htm

No caso da Terra, as forças diferenciais gravitacionais da Lua e do Sol produzem um torque que tende a alinhar o eixo de rotação da Terra com o eixo da eclíptica, mas como esse torque é perpendicular ao momento angular de rotação da Terra, o seu efeito é mudar a direcção do eixo de rotação, sem alterar a sua inclinação.

Portanto, os pólos celestes não ocupam uma posição fixa no céu: cada pólo celeste move-se lentamente em torno do respectivo pólo da eclíptica, descrevendo uma circunferência em torno dele com raio de 23,5º . O tempo necessário para descrever uma volta completa é 25 770 anos. Actualmente o Pólo Norte Celeste está nas proximidades da estrela Polar, na constelação da

Ursa Menor, mas isso não será sempre assim. Daqui a cerca de 13000 anos ele estará nas proximidades da estrela Vega, na constelação de Lira.

5.10.1 Caminho aparente do Polo Norte celeste no céu

Apesar de o movimento de precessão ser tão lento (apenas 50,290966" por ano), ele foi percebido pelo astrónomo grego Hiparcos, no ano 129 a.C., ao comparar as suas observações da posição da estrela Spica (Alfa Virginis) com observações feitas por Timocharis de Alexandria em 273 a.C. Timocharis tinha medido que Spica estava a 8° do ponto vernal, mas Hiparcos media somente 6°. Ele concluiu que o ponto vernal se tinha movido 2 graus em 144 anos.

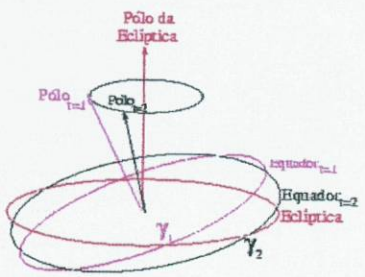


Figura 5.10 Variação da direcção do pólo ao longo do tempo
Retirada de http://pcastro7.if.ufrgs.br/index.htm

O movimento de precessão da Terra é conhecido como *precessão dos equinócios*, porque, devido a ele, os equinócios (ponto vernal e ponto outonal) deslocam-se ao longo da eclíptica no sentido de ir ao encontro do Sol (retrógrado em relação ao movimento da Terra em torno do Sol).

Uma consequência da precessão é a variação da ascensão recta e da declinação das estrelas. Por isso os astrónomos, ao apontarem os seus telescópios para o céu, devem corrigir as coordenadas tabeladas da estrela que irão observar pelo efeito de precessão acumulado desde a data em que as coordenadas foram registadas até a data da observação.

A próxima correcção ao movimento em termos de importância chama-se **nutação,** e é devida à componente não circular (bamboleio) do movimento do pólo da Terra em torno do pólo da eclíptica. causada pelas variações na inclinação da órbita da Lua em relação à órbita da Terra em torno do Sol (de 18° 18' a 28° 36'). A principal contribuição da nutação na obliquidade tem uma

amplitude de 9,2025" e período de 18,613 anos, mas contribuições menores, como 0,57" com períodos de 182,62 dias, também estão presentes.

As forças diferenciais do Sol e da Lua sobre a Terra são mais complexas do que a aproximação exposta até aqui, pois os três corpos não são esféricos. Além disso existe ainda a pequena contribuição das forças diferenciais causadas pelos restantes planetas sobre a Terra.

Na realidade, por complemento, devido ao torque causado pela Lua, Sol e outros planetas, e devido aos deslocamentos de matéria em diferentes partes do planeta (exemplo: elasticidade do manto, achatamento da Terra, estrutura e propriedades da borda entre núcleo e manto, reologia do núcleo, variabilidade dos oceanos e da atmosfera), a inclinação (obliquidade) do eixo da Terra em relação ao eixo da eclíptica decresce 0,46815 "/ano.

Capítulo 6 - Interacção magnética

6.0 Interacção magnética

Neste capítulo vamos estudar outra força unificadora do Universo – a força magnética - e alguns fenómenos a ela associados a nível planetário.

6.1 Introdução

O magnetismo é uma das forças naturais que mantêm o Universo unido e fazem do cosmos uno. Faz parte da nossa vida diária de tal forma que começamos a ficar imunes a ele. Os magnetes permanentes e os electroímans estão popularizados por todo o lado. De seguida procura-se fazer um estudo do fenómeno à escala planetária.

Inicia-se por um breve estudo da geometria básica do campo e da sua provável origem. De seguida contempla-se as manifestações em grande escala dos campos magnéticos e a sua influência no ambiente.[7]

O sistema solar é dominado pela heliosfera –a magnetosfera do Sol- e todo o objecto dentro da sua influência deve necessariamente interagir de algum modo com o plasma supersónico que flui do Sol. Os campos intrínsecos dos planetas, por exemplo, podem produzir cavidades em torno deles próprios, protegendo-os do vento solar.

De seguida faz-se uma análise desses campos incidindo de algum modo sob a forma como foram descobertos e algumas das propriedades dos mesmos.

O conhecimento dos campos dos planetas é uma ferramenta geofísica muito importante para a exploração do interior desses mundos. A intensidade, a orientação e o índice harmónico ajudam a conhecer a conductividade, a distribuição maciça interna e o estado físico desses lugares.

---

[7] Não se faz aqui um estudo exaustivo do magnetismo, em virtude de não ser esse o objectivo. Quem pretender aprofundar conhecimentos sobre este pode consultar por exemplo "Purcell: Electricity and Magnetism – Berkeley, Physics Course, vol 2, 2/e, McGraw-Hill".

6.2 A origem dos campos magnéticos planetários

Qualquer que seja o modelo construído para explicar a fonte do campo magnético da Terra, este deve ter em consideração que tal é um trabalho duro e que deve estar de acordo com inúmeras condicionantes. Deve explicar não somente a geometria do campo observado, a sua inclinação, a sua intensidade, o seu espectro harmónico, mas também a mudança secular destes elementos - a tracção na direcção ocidental, as variações e as reversões. Deve ser fisicamente plausível. Deve estar de acordo com a estrutura interna do planeta, definida pela sismologia, da qual fazem parte:

- ✓ Um núcleo interno contínuo de ferro/níquel, de diâmetro ~2500km, com uma densidade de ~13g cm^{-3} e uma temperatura de 6900-8000K.
- ✓ Um núcleo exterior líquido, de ferro ligado a um elemento mais leve (provavelmente enxofre, mas incluindo o potássio, o silício ou o oxigénio), de diâmetro aproximadamente 6950km, com uma densidade de 10-12g cm^{-3}, uma temperatura de 4800-6900K, uma viscosidade ao redor 6 centipoise (a viscosidade da água em 25°C é 0,89 centipoise), e uma conductividade de $5x10^5$ - 10^6 mho/m.
- ✓ Um manto de silicato que se estende de uma profundidade de ~70km até ao núcleo exterior líquido. Este é composto na sua maior parte por silicato de magnésio, cristal de estrutura com descontinuidades discretas, identificadas por reflexão em sismologia. O manto superior tem uma conductividade de ~1 mho/m; a conductividade do manto inferior supõe-se ser ~$3x10^2$ mho/m. A viscosidade do manto é da ordem dos 10^{21}-10^{23} Pa. Na base do manto supõe-se existir uma camada térmica e química de limite em torno dos 200km, que é denominada camada D. A topologia neste limite, e as variações na sua conductividade podem ser responsáveis por algumas características importantes do campo da Terra.
- ✓ Uma crosta de silicato, que no que respeita à geração do campo tem relativamente pouca importância, e a que não será dada particular relevância.

Os interiores dos outros planetas terrestres são similares, com as seguintes excepções:

- ✓ O núcleo de Mercúrio é muito grande em relação ao tamanho do planeta e espera-se ser quase inteiramente continuo.
- ✓ O núcleo de Marte crê-se também ser continuo, embora ainda sejam necessários mais estudos sismológicos, para o demonstrar.
- ✓ O núcleo lunar, no caso da existência de um núcleo, é muito pequeno e provavelmente continuo.
- ✓ Os interiores dos gigantes gasosos e de alguns dos seus satélites, embora diferentes dos interiores dos planetas terrestres, têm campos intrínsecos. As implicações das diferentes estruturas na geração de campos magnéticos serão abordadas posteriormente.

O modelo que satisfaça todas as condições anteriores, deve também ser um modelo que produza um campo de acordo com a energia disponível. O modelo não será bom se necessitar de mais energia do que a acessível das várias fontes internas (o mecanismo deve permitir as variações do campo magnético de acordo com a energia que circula).

Os campos magnéticos podem originar dos campos remanescentes permanentes no material magnetizado abaixo das suas temperaturas de Curie, e/ou do movimento de partículas carregadas em campos eléctricos.

6.3 Teorias para a origem dos campos magnéticos planetários

Muitas teorias diferentes foram sugeridas para explicar a geração de campos magnéticos dentro dos planetas:

- ✓ O campo gerado por uma carga eléctrica em movimento.
- ✓ O efeito giromagnético.
- ✓ Rotação diferencial.
- ✓ Hipótese de Blackett.
- ✓ Efeitos termoeléctrico.
- ✓ Os efeitos de Galvano - magnetismo e de Termo- magnetismo.
- ✓ O efeito de salão (efeito de Hall).
- ✓ Teoria do dínamo.

No entanto, após diversos estudos algumas teorias foram sendo postas de parte e a teoria que neste momento parece gerar consenso é a teoria do dínamo.

E esta teoria consiste, num mecanismo electromagnético de indução agindo no núcleo exterior fluido - não completamente dissimilar ao dínamo comum da Terra ou da bicicleta do jardim. Joseph Larmor em 1919, foi o primeiro a sugerir este mecanismo, cuja teoria se desenvolveu com contribuições importantes de investigadores tais como Walter Elsasser e Edward Bullard, durante os anos 30, 40 e os 50; e Eugene N. Parker, que em 1955, escreveu o seu tratado sobre dínamos astrofísicos.

A analogia mais simples e mais comum usada para o geodínamo (usado nos anos 40 antes da aplicação dos princípios da magneto-hidrodinâmica) é o dínamo homopolar do disco. Um disco de metal gira através das linhas do campo de um íman de barra. Forças de Lorentz (**B** X **v**) agem em electrões provocando um deslocamento da carga do centro do disco para a sua borda que, desde que o circuito seja fechado, permite que uma corrente flua. Se removermos o íman de barra e o substituirmos com um electroíman em série com o circuito, desde que um campo inicial actue para a corrente começar a fluir, o campo induzido no electroíman pela corrente reforçará o fluxo e tornar-se-á auto-suficiente.

Seria fácil confundir isto com algum tipo de máquina perpetua do movimento, até que seja explícito que é a energia mecânica do disco a girar que é transformada em energia magnética. Um ponto importante a anotar é que este dínamo é auto-suficiente somente porque é assimétrico; o mecanismo cessaria de trabalhar, para o exemplo dado, se uma outra bobina electromagnética fosse introduzida no circuito no outro lado do disco. A implicação que este facto tem para o geodínamo é que o mesmo não pode ser simétrico, uma ideia que foi introduzida em 1934 por Thomas G. Capota. (embora o teorema de Cowling seja mais complicado, pode ser reduzido à indicação que os dínamos assimétricos não são auto-suficientes.)

O modelo homopolar do dínamo do disco é transposto facilmente para o núcleo exterior da Terra. O disco conductor é substituído pelo ferro líquido no núcleo exterior (conductividade ~10^6 mho/m) e o movimento é fornecido pela convecção deste líquido. Assim a fonte da energia é o calor que está na origem da convecção. Podemos supor que o campo original foi induzido ou por uma concentração de linhas interestelares do fluxo, ou pelo campo do Sol. As correntes que foram geradas criaram o seu próprio campo magnético e assim o

sistema tornou-se auto-suficiente. Um dos problemas com este modelo simplista é que os movimentos do líquido nos hemisférios norte e sul são simétricos e este impede que o dínamo auto-suficiente trabalhe. Contudo, no núcleo interno, o líquido está a girar junto com o resto da Terra e está por isso, sujeito à força de Coriólis. A força de Coriólis age em sentidos opostos em cada hemisfério, diminuindo a simetria do sistema e permitindo que o dínamo trabalhe.

Para apreciar mais a potência da teoria do dínamo temos que aprender mais, não somente sobre a história magnética da Terra, mas também sobre os interiores dos planetas terrestres e dos seus registos paleomagnéticos.

6.4 O Universo e as magnetosferas

6.4.1 As Magnetosferas

O conceito da magnetosfera foi proposto inicialmente em 1908 por Kristian Birkeland e o seu nome foi dado em 1959, após investigação intensiva feita em conjunto com o ano Internacional Geofísico (IGY) de 1958. A forma da cavidade e o facto da sua extensão ser no sentido contrário ao vento, dando forma a uma cauda magnética, foi estabelecida em 1965 por Normando Ness. A geometria da magnetosfera terrestre, bem como os termos chaves, é ilustrada na figura 6.1 como uma fatia ao longo do plano do meridiano da meia-noite.

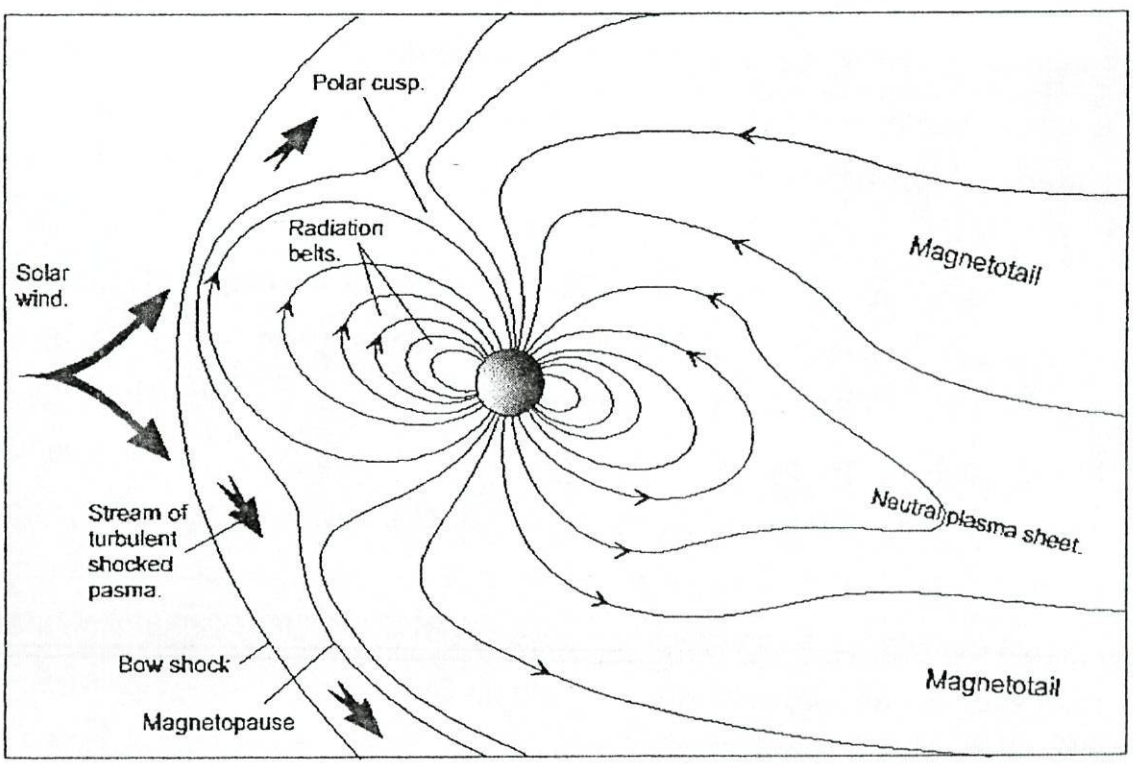


Figura 6.1 – Magnetosfera terrestre
Retirada de http://csep10.phys.utk.edu/astr161/lect/earth/magnetic.html

O campo geomagnético pode ser pensado como um obstáculo num fluxo fluido, com o plasma a expandir-se a partir do Sol. Este plasma flui em torno do obstáculo turbulentamente e dá forma a um sulco no lado oposto ao vento solar. Forma-se uma curva de choque no vento superior, enquanto a velocidade do plasma diminui das velocidades supersónicas (~400km/s) em consequência do impacto com o obstáculo. O ponto de estagnação do vento solar é definido como o ponto solar secundário, onde a pressão magnética do campo geomagnetico balança precisamente a pressão de choque do vento solar. Porque a actividade solar cresce e diminui, esta pressão varia e a magnetosfera, em resposta, expande-se e contrai-se de acordo com essa variação.
O ponto da estagnação (conhecido também como a magnetopausa) é observado tipicamente a uma distância radial de ~$10R_{\oplus}$ ($1R_{\oplus}$ = 6371km).

A curva de choque –bow shock[8]- é a região em que o plasma do vento solar é retardado da sua velocidade supersónica de 400km/s pelo campo magnético da Terra. O bow shock é observado tipicamente 2 a $3R_{\oplus}$ à frente do limite da magnetopausa, sendo a região que os separa - o magnetosheath - preenchida com o plasma turbulento que arrefece rapidamente ao fluir e chocar em torno da magnetosfera.
Nesta descrição a magnetopausa pode ser retractada como uma folha, no limite entre o vento solar e a magnetosfera, que reflecte todas as partículas carregadas, selando eficazmente a entrada de material externo à cavidade. Porém este modelo de magnetosfera baseia-se na suposição de que as linhas do campo dentro da magnetosfera são todas paralelas à magnetopausa, que não há nenhum gradiente resultante da força do campo perto do seu limite, e que o vento solar não está magnetizado. Por muito tempo, pensou-se consequentemente, que a magnetosfera era fechada. No entanto, o vento solar interplanetário transporta partículas carregadas electricamente, logo é magnetizado, assim torna-se aparente que as linhas de campo devem estar ligadas à magnetosfera terrestre, e deve assim existir um gradiente magnético. A magnetosfera aberta, está representada na figura 6.2.

[8] Em virtude da dificuldade da tradução de alguns termos, será apresentada a sua nomenclatura em inglês.

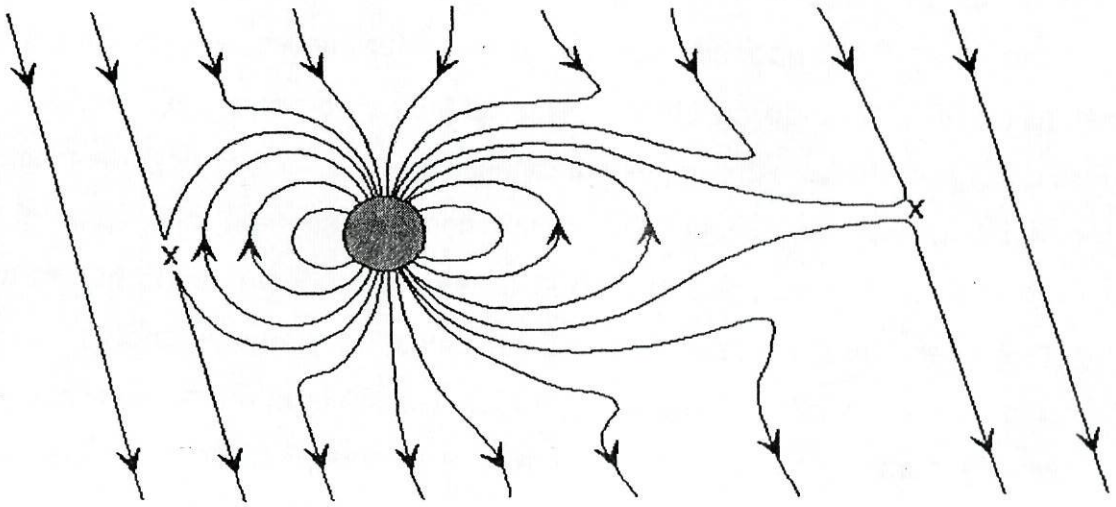


Figura 6.2 – Magnetosfera aberta

Retirada de http://www-istp.gsfc.nasa.gov/Education/wmagstrm.html

As linhas do campo não são paralelas à magnetopausa, e as linhas interplanetárias do campo passam directamente ao longo da extremidade do pólo magnético terrestre, permitindo o acesso interrupto dos protões e dos electrões do vento solar à atmosfera da Terra. As linhas interplanetárias do campo estão dirigidas para o Sul, no mesmo sentido que o campo terrestre. O campo interplanetário, por sua vez, muda de sinal próximo da Terra, tal como a saia de uma bailarina, para cima e para baixo. Na situação onde o campo interplanetário magnético é dirigido para o norte, a conexão com as linhas do campo geomagnético não é permitida e a magnetosfera actua como uma cavidade fechada com linhas do campo interplanetário presas sobre ela. Quando o campo interplanetário magnético é dirigido para o sul, o gradiente criado na magnetopausa permite que partículas carregadas passem através da magnetopausa. Esta assimetria da carga através dos dois lados da magnetosfera ajuda a movimentação das correntes da cauda magnética. (Ver figura 6.1)

A espessura da magnetopausa varia de acordo com a força local do campo magnético. No ponto solar secundário a espessura é da ordem de 100km. Porém, acima dos terminais chega a ter mais de 1500km. Além disso as correntes na magnetopausa fazem com que a sua geometria seja ligeiramente comprimida para dentro, na direcção dos pólos magnéticos, como é aparente nas figuras anteriores.

O próprio campo geomagnético adquire uma forma alongada sob a influência da pressão do vento solar. No lado da direcção do Sol o campo é comprimido, geralmente a $10R_{\oplus}$, podendo ser, comprimido durante as tempestades solares dentro de $6R_{\oplus}$. No lado oposto ao vento as linhas do campo esticam para fora para dar forma a uma estrutura cilíndrica afilando-se uma longa cauda magnética conhecida como "magnetotail". O comprimento desta cauda é variável, mas extende-se geralmente por 600 a $1000R_{\oplus}$.. Em torno desta cauda há um manto frio (baixa energia), plasma denso, e ao longo do plano equatorial (onde há cancelamento das linhas do campo para fora) existe uma outra folha de plasma, designada geralmente como a folha neutra – neutral plasma sheet-. Ambos agem como guias para as cargas que fluem em torno da magnetotail.
Os raios cósmicos são assim vistos como uma indicação de que a magnetopausa é permeável e que as partículas podem migrar profundamente na magnetosfera.

A magnetosfera terrestre não é única[9]. Missões espaciais a outros planetas do sistema solar verificaram que alguns são magnetizados. Em particular, os planetas gigantes têm um campo muito mais intenso do que a Terra e as suas magnetosferas são muito maiores do que a nossa. Mercúrio, tem um momento magnético 1/2000 menor do que a Terra e uma pequena magnetosfera. Vénus aparenta ser não magnético e Marte pode ter um campo fraco. As magnitudes do momento de dipolo de Mercúrio, Terra, Júpiter, Saturno, Urano e Neptuno, em unidades de 10^{25} Gauss.cm^3 são: ~0.004, 7.9, 150000, 4300, 420, 200 respectivamente. [Lepping, 1995].
Por fim, a Lua apresenta algumas zonas rochosas magnetizadas e pode ter tido um campo quando essas rochas se formaram.
A origem dos outros campos planetários parece ser diferente da da Terra. Sabe-se pouco acerca dos mesmos, podendo-se apenas especular sobre o assunto. Por exemplo, será que o magnetismo de Júpiter ou Saturno tem origem no hidrogénio metálico que se pensa pode existir nos seus centros, devido às elevadas pressões? E uma vez que Urano e Neptuno não têm pressão suficiente

[9] Voltará a ser estudada com mais pormenor, quando se estudar o campo magnético terrestre.

para o hidrogénio se tornar metálico, serão os seus interiores constituídos por correntes de iões dissolvidos em gelos de água e metano?

A magnetização de Mercúrio, Marte e Lua deve pertencer a uma classe diferente. Em particular, a Lua, e talvez Marte, podem conter rochas magnetizadas permanentemente, que tiveram origem em lavas do passado e que se tornaram ao longo do tempo fracamente magnetizadas (tal como sucede na Terra). Isto no entanto ainda continua hoje a ser especulação.

A forma das outras magnetosferas no nosso sistema solar bem como os tipos de actividade dentro das mesmas, são comparáveis com a magnetosfera terrestre. Na maioria dos casos as diferenças são meramente na escala. A magnetosfera de Júpiter, por exemplo, é cem vezes maior do que a nossa e acredita-se que a sua cauda se estenda por 600 milhões de quilómetros - até a órbita de Saturno!

As magnetosferas de Urano e de Neptuno são diferentes em virtude das orientações originais dos seus dipolos. O dipolo de Urano gira mais ou menos em torno da linha que une o Sol ao planeta, o que dá às linhas do campo na região da cauda uma torção helicoidal.

As magnetosferas dos planetas gigantes diferem, em vários aspectos, da magnetosfera terrestre.

✓ Primeiro são muito maiores, não apenas porque os momentos destes planetas são maiores, mas porque o vento solar fica mais rarafeito à medida que se afasta do Sol. Ambos os factores fazem com que o vento solar seja parado mais longe do planeta do que no caso da Terra. Contudo a velocidade do vento solar fora da acção da magnetosfera permanece a mesma ~400Km/s. Como resultado, o vento solar necessita de mais tempo para atravessar o comprimento da magnetosfera. No caso da Terra, o vento solar leva aproximadamente 1 hora para atravessar desde o nariz até à cauda da magnetosfera (~200$R_{\oplus}$). Durante essa hora a Terra roda 15° e se as linhas de campo abertas interagem com o vento, podem sofrer uma distorção de 15°

Se a magnetosfera de Júpiter tiver as mesmas proporções, o vento solar deve levar 2-3 dias para cobrir a distância correspondente (~0.5 UA), durante o qual o planeta deve rodar 5-7 vezes sobre o seu eixo. Assim, esperamos que os lóbulos da cauda magnética de Júpiter sejam mais distorcidos.

✓ Segundo, a magnetosfera destes planetas é influenciada pelos seus satélites e anéis. A magnetosfera de Júpiter é rica em iões enxofre, que se acredita terem origem nos vulcões sulfurosos de Io. Pode também ser esta a fonte da nuvem de sódio em redor do planeta, estudada por telescópios da Terra.

✓ A terceira diferença é o tipo de rotação do planeta. A Terra é rodeada por uma nuvem fria de plasma, essencialmente nas camadas altas da ionosfera, que se estende até ~$5R_{\oplus}$ e que roda com a Terra.

Os planetas com maiores magnetosferas, Júpiter e Saturno, rodam rapidamente (Período ~10 horas) e dados do espaço sugerem que o plasma em redor deles tem um papel muito mais activo na sua rotação do que no caso da Terra.

✓ Finalmente, existem diferenças na inclinação dos eixos magnéticos. A Terra possui um eixo magnético inclinado de 11.2° em relação ao eixo de rotação, ele próprio inclinado de 23.5° em relação à direcção perpendicular ao plano de orbita da Terra que contém a direcção com que o vento solar chega.

O eixo magnético de Júpiter está inclinado em relação ao eixo de rotação aproximadamente o mesmo. A sua polaridade magnética Norte-Sul é oposta à da Terra (mas as rochas terrestres indicam que esta sofreu inversões ao longo do tempo).

O eixo magnético de Saturno parece estar alinhado exactamente com o eixo de rotação, apesar dos erros de observação. Desde 1931 que Cowling afirmou que o campo planetário de dínamo não pode ser axialmente simétrico. Contudo, uma vez que as irregularidades magnéticas desaparecem rapidamente com a distância, pode ser que observações mais próximas do planeta encontrem alguma assimetria.

A real surpresa vem de Urano, cujo eixo de rotação está aproximadamente paralelo com o plano orbital. Baseado nas experiências com a Terra, Júpiter e Saturno, os cientistas esperavam que o eixo magnético de Urano estivesse próximo do eixo de rotação, e também apontasse na direcção do Sol. Esperavam pois uma magnetosfera completamente diferente. Uma magnetosfera "head-on" que se encontrasse com o vento solar, não com um "nariz" formado pelas linhas de campo (tal como na Terra), mas com uma região suave.

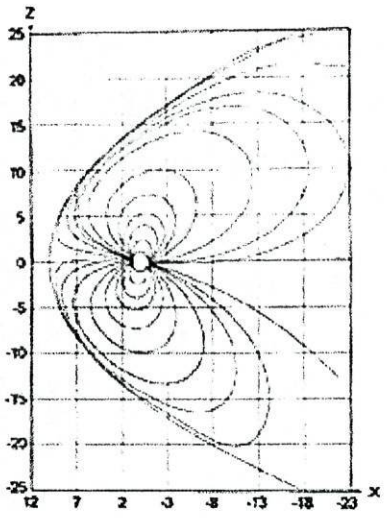


Figura 6.3– Uma magnetosfera head-on

Retirada de http://www-istp.gsfc.nasa.gov/Education/index.html

Mas não foi isso que a Voyager2 encontrou. Esta observou que o eixo de rotação actualmente está inclinado de 60º em relação ao plano da eclíptica.

Neptuno é similar, com o seu eixo magnético a formar um ângulo de 47º com o eixo de rotação.

Todas estas observações sugerem não só que a magnetosfera terrestre não é única, mas que são possíveis diferentes tipos de magnetosferas no sistema solar.

6.5 Os diferentes campos magnéticos

De seguida apresenta-se uma tabela resumo com valores, de algumas grandezas, para diferentes corpos do sistema solar dos quais alguns deles serão desenvolvidos em mais detalhe. As unidades utilizadas por vezes durante o texto seguinte não são sempre as mesmas, daí a apresentação deste quadro síntese para uma posterior comparação de valores. Sempre que em índice de surgir uma letra associada a uma grandeza, esta representa a inicial do planeta.

Planeta	Momento de dipolo (Tm^3)	Pressão normal do vento solar dyne cm^{-2}	Ponto de estagnação
Mercúrio	$\sim 3 \times 10^{12}$	6.3×10^{-8}	$\sim 1 R_{MY}$
Vénus	$< 8 \times 10^{10}$ (induzido)	2.6×10^{-8}	$< 1 R_V$
Terra	7.8×10^{15}	1.33×10^{-8}	$\sim 10.4 R_E$
Lua	$< 1.3 \times 10^{8}$ (remanenscente)	1.33×10^{-8}	n/a
Marte	$\sim 10^{11}$ (induzido)	5.75×10^{-9}	$\sim 1.5 R_{MA}$
Júpiter	1.56×10^{20}	5×10^{-10}	$\sim 50 R_J$
Io	$\sim 8 \times 10^{12}$ (induzido?)	n/a	n/a
Europa	$\sim 7 \times 10^{11}$ (induzido?)	n/a	n/a
Ganymedes	1.4×10^{13}	n/a	n/a
Saturno	4.72×10^{18}	1.45×10^{-10}	$\sim 20 R_S$
Urano	3.83×10^{17}	3.60×10^{-11}	$18.04 R_U$
Neptuno	2.16×10^{17}	1.46×10^{-11}	$\sim 26 R_N$

6.5.1 Campo Magnético do Sol

O Sol possui um intenso e complexo campo magnético e muita da actividade solar está directamente relacionada com as propriedades do campo magnético.

George Ellery Hale (1868-1938) foi quem primeiro detectou os campos magnéticos solares. Utilizando um instrumento, o espectrógrafo de alta dispersão, ele descobriu que algumas riscas espectrais produzidas nas proximidades das manchas solares eram duplas ou até mesmo triplas. Ou seja, no lugar de uma linha com certo comprimento de onda, via-se uma linha à direita e à esquerda daquele comprimento de onda, ou até mesmo a original e duas outras laterais. Esse fenómeno de duplicação de linhas é chamado de efeito Zeeman e ocorre quando a fonte emissora de luz está submetida a um campo magnético (nesse caso a fonte emissora é a mancha solar). Hale pode calcular que o campo nessa região chega a 5000 Gauss e ainda conseguiu provar que o campo magnético geral, gerado pelo Sol, é da ordem de 1 a 2 Gauss. Esse campo magnético está dirigido de norte para sul, excepto nas regiões de maior intensidade (da ordem dos milhares de Gauss), nas quais estão dispostos no sentido leste-oeste. O estado de plasma, em que se encontra a matéria solar, oferece pouca resistência à corrente eléctrica, o que faz com que toda a estrela se comporte como uma bobine eléctrica.

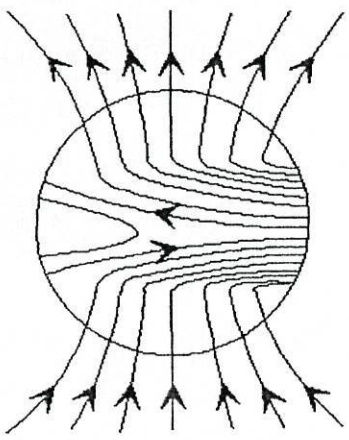


Figura 6.4 Contracção das linhas de campo
Retirada de
http://csep10.phys.utk.edu/astr162/lect/sun/

Descobriu-se posteriormente que as linhas de força do campo magnético estão confinadas ao plasma, ou seja, comportam-se como se estivessem ligadas às partículas que o compõem e acompanham o fluxo de matéria. Por isso a rotação diferenciada acaba por deformar essas linhas como se fossem tiras de borracha. As linhas do campo magnético sofrem um processo de condensação, até cada grupo assumir a forma espiralada. Daí se encontrarem espirais ao longo de

todos os meridianos e todas no sentido leste-oeste (sentido de rotação). A concentração dessas linhas equivale a maior intensidade dos campos magnéticos em relação à situação inicial, e, como a rotação não é uniforme, cada espiral pode ser esticada até formar um laço. Em certos momentos os laços rompem-se e afloram á superfície. Nesse momento temos a formação das manchas solares.

Em zonas onde o campo magnético é muito intenso, as linhas por vezes ficam quase perpendiculares à superfície e a matéria tende a mover-se ao longo das mesmas. Quando isso acontece há um bloqueio no movimento convectivo. Reduz-se então a propagação do calor em certas áreas, que se tornam mais frias do que as áreas circunvizinhas, emitindo pouca radiação. Isto é o que caracteriza a mancha solar na fotósfera.



Figura 6.5 – Linhas de campo numa mancha solar
Retirada de
http://web.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/SSN/ssn.html

Constatou-se que o número de manchas solares sofre variações periódicas e que essas variações estão ligadas ao "Sol calmo" e ao "Sol activo", referidas anteriormente. Partindo do "Sol calmo", estado de mínima actividade, observa-se que num período de 4,6 anos há um aumento rápido das manchas, no final do qual é atingido um valor máximo das mesmas. Após esse máximo decorrem cerca de 6,4 anos durante os quais se constata uma diminuição gradual nas manchas, atingindo-se novamente uma actividade mínima. No total entre um estado de 4,6 anos de "Sol activo" e o outro estado de 6,4 anos de "Sol calmo" decorrem cerca de onze anos. Embora cada onze anos de actividade seja igual ao outro no seu aspecto visual, deve-se realçar que a polaridade magnética do Sol se inverte, no final de cada 11 anos. Por essa razão temos um período completo vinte e dois anos de actividades solares, no final do qual o ciclo recomeça.

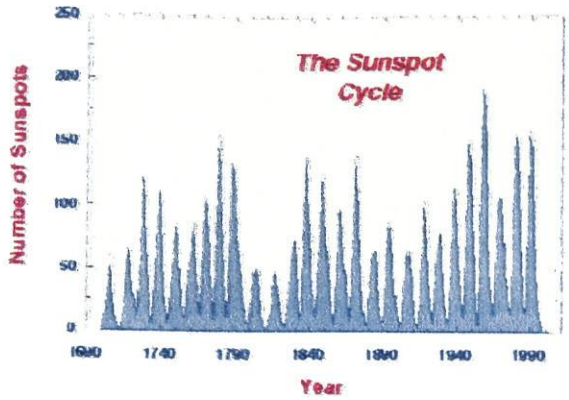


Figura 6.6 – Representação gráfica do ciclo solar entre 1690 e 1990
Retirada de http://csep10.phys.utk.edu/astr162/lect/sun/sscycle.html

Medições da luz através das manchas solares e o estudo do efeito de Zeeman, permitiram conhecer que:

- quando as manchas surgem em pares, tendem a ter polaridades opostas (idêntico a uma barra magnética);
- durante o deslocamento de um grupo de manchas ao longo do ciclo solar, no hemisfério Norte do Sol as manchas mantêm a mesma polaridade, o mesmo se passando para um grupo de manchas no hemisfério Sul, excepto que entre os hemisférios a polaridade é oposta;
- durante o ciclo seguinte, as regularidades observadas no anterior invertem-se: a polaridade de um grupo de manchas é oposta da do ciclo anterior.

Um fenómeno que pode ser observado na região do Solsão são as denominadas protuberâncias solares, que se elevam da cromosfera para a coroa. Estas são visíveis sem a ajuda de instrumentos durante os eclipses solares totais, ou com o auxílio do coronógrafo. Essas protuberâncias podem ser eruptivas, de curta duração, ou protuberâncias quiescentes, que podem durar várias rotações solares. As protuberâncias possuem uma densidade muito superior à coroa circundante e uma temperatura de 10.000 a 20.000 K. Estes fenómenos são devidos à associação de campos magnéticos que variam de 20 a 200 Gauss.

Quando as explosões que dão origem às protuberâncias ocorrem, e elas ocorrem principalmente nas proximidades das manchas solares na fotosfera, é que se percebe a influência do Sol sobre a atmosfera terrestre. Tal actividade pode interromper as comunicações a longas distâncias. Nessa altura partículas

com muita energia são lançadas para o espaço e atingem a Terra provocando uma ionização da atmosfera terrestre. Em consequência, a atmosfera terrestre deixa de reflectir as ondas de rádio emitidas pelo Sol para o espaço e as ondas de rádio das emissoras de volta para a Terra, podendo interromper as comunicações a longa distância. Grande parte da radiação emitida pelo Sol é atenuada na nossa atmosfera, a qual actua como filtro, bloqueando as radiações mais prejudiciais a formas de vida na superfície terrestre.



Figura 6.7 – Fenómenos explosivos no Sol

Retirada de http://csep10.phys.utk.edu/astr162/lect/sun/sscycle.html

6.5.2 Campo magnético de Mercúrio

Muitas das descobertas sobre Mercúrio foram realizadas através da sonda Mariner 10, mas apenas na primeira e na terceira aproximações, é que se conseguiram informações sobre o momento e o campo magnético de Mercúrio.

Em Março de 1974, quando a Mariner 10 visitou o lado escuro de Mercúrio detectou alterações na intensidade e direcção do campo, associadas à entrada na cavidade magnetosférica do planeta. A intensidade máxima do campo é ~100nT e foi considerada como o valor do campo intrínseco de Mercúrio. A magnetosfera situa-se entre $1R_M$ e $2R_M$.

Os registos da Mariner 10 não foram suficientes para determinar a geometria do campo ou mesmo o seu momento. O momento de dipolo computadorizado foi calculado através da intensidade do campo necessária para suportar a magnetopausa a $1.6R_M$ contra a pressão do vento solar. Os valores determinados desta forma variam com a densidade do vento solar e situam-se entre $3.1x10^{12}Tm^3$ e $5.5x10^{12}Tm^3$. Mais tarde com a introdução de modelos mais

complexos o momento de dipolo foi estimado em $5x10^{12}Tm^3$ para um modelo usando um campo externo uniforme[10] ~50nT.

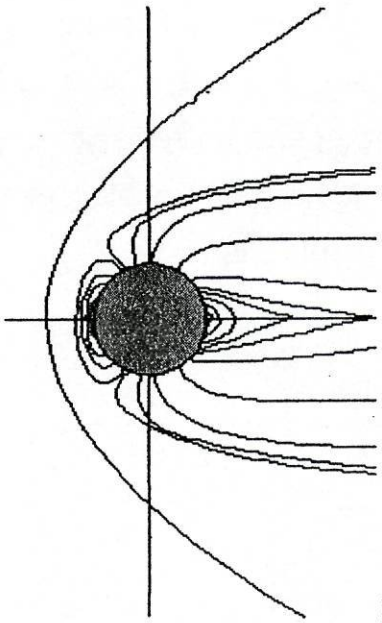


Figura 6.8 – Magnetosfera de Mercúrio

Adaptada de http://www-spof.gsfc.nasa.gov/Education/wmfield.html

A intensidade do campo magnético de Mercúrio é demasiado reduzida para ser resultado de mecanismos externos de indução. Um campo interno pode ser atribuído quer à magnetização remanescente da crusta quer a um núcleo de dínamo activo.

A Mariner 10 mostrou que Mercúrio tem um campo magnético que é 1% mais forte que o da Terra. Este campo magnético está inclinado 7 graus em relação ao eixo de rotação de Mercúrio e produz uma magnetosfera à volta do planeta. O campo magnético pode ter diferentes origens. Vários modelos têm surgido para a explicação do campo, no entanto a investigação sismológica continua os testes.

6.5.3 Interacções do vento solar com Vénus

Vénus tem aproximadamente a dimensão da Terra (R_V = 6051 Km: R_T = 6371Km), mas a sua rotação é muito mais lenta (243 dias, retrógrado). Aplicando a hipótese de que o momento magnético do planeta é proporcional ao momento de inércia – proposto por Blakectt – prevê-se para Vénus um momento magnético de $1.9x10^{13}Tm^3$ e assim um campo na superfície de 86 nT.

---

[10] http://csep10.phys.utk.edu/astr162/

A Mariner 2 foi o primeiro veiculo a viajar a Vénus, em 14 de Dezembro de 1962, transportando um magnetómetro medidor de fluxo. Ao passar no ponto mais próximo, 6.6 R_V, não foram detectadas nenhumas flutuações no campo associado a este planeta. A barreira de choque só foi detectada cinco anos mais tarde pela sonda Russa Venera 4, que entrou na atmosfera do planeta. Um dia mais tarde, em 19 de Outubro de 1967, a Mariner 5 esteve a 1.7 R_V e também detectou a barreira de choque e uma cauda magnética consistente com um campo intrínseco. Contudo, o magnetómetro da Venera4 registou valores que contradiziam os dados americanos e que eram mais consistentes com a hipótese de os campos observados resultarem de interacções da atmosfera com o vento solar. Tais campos seriam criados pelas linhas de campo interplanetárias numa ionosfera condutora, dando origem a zonas mais intensas que seriam as responsáveis pela barreira observada em Vénus.

A partir de 1978, iniciaram-se 14 anos importantes na exploração e estudo do campo magnético de Vénus. A missão Pionner mediu campos fracos na ionosfera, ~5nT, com pequenos picos de 60nT. Durante o período que a Pionner se manteve em observação (11 anos), estes picos de fluxo aumentaram de magnitude até ~150nT. De acordo com os resultados da missão Pionner o momento magnético de Vénus é menor do que $8x10^{10}Tm^3$ (1/1000 do momento de dipolo da Terra), sendo o limite superior de contribuição do dipolo para o campo de superfície de $8x10^{10}x(6051000)^3 = 0.36nT$. Este valor é neglicenciável, ficando claro que a estrutura de choque e a cauda magnética são resultado da interacção da atmosfera superior do planeta com o vento solar A polaridade da cauda varia com a direcção do campo magnético interplanetário, suportando a hipótese de que é uma estrutura induzida.

A hipótese para explicar esta falha aparente do campo magnético de Vénus surgiu em 1983 por David Stevenson. Ele sugeriu que o reduzido tamanho de Vénus é suficiente para alterar o gradiente de pressão-temperatura no interior do planeta de forma a que o fluido no seu centro permanece abaixo da curva de congelação/solidificação. A curva P-T para o interior da Terra intersecta esta curva $\sim 3.3x10^{11}Pa$ (a pressão central $\sim 3.6x10^{11}Pa$) permitindo que o ferro solidifique e se forme um núcleo sólido, o que irá permitir a libertação de $2x10^{12}W$ de energia, o suficiente para gerar o geodínamo. A pressão no centro

de Vénus é $2.85x10^{11}$Pa, que é próxima do ponto de solidificação do núcleo fluido (assumindo uma composição similar à da Terra). Assim, o núcleo de Vénus, se encontra não cristalizado, não existindo a fonte de energia necessária para gerar o geodínamo. Isto não significa que Vénus não possa ter tido um dínamo activo no passado, pois quando jovem a sua energia deve ter sido suficiente para suster um dínamo. Infelizmente, parece pouco provável virmos a descobrir se esse é o caso, uma vez que não podemos realizar o estudo das suas rochas como fazemos a Terra A temperatura de Vénus (740K) é inferior à temperatura de Curie dos materiais da sua superfície, e por isso nenhum campo remanescente deve ter ficado retido. O que diferentes ideias sugerem sobre o interior de Vénus, é que no futuro o planeta deve ser capaz de gerar um campo intrínseco, quando a temperatura do núcleo for suficiente para se iniciar a cristalização. Para determinar se tal acontecerá, são requeridos estudos sismológicos aprofundados do interior do planeta.

6.5.4 Campo Magnético da Terra

6.5.4.1 Origem do campo magnético

A origem do campo magnético terrestre não é totalmente conhecida, mas pensa-se estar associado às correntes eléctricas produzidas pelos efeitos convectivos e pela rotação de spin do metal líquido do núcleo exterior de ferro/níquel. Este efeito é conhecido como efeito de dínamo.

O campo magnético terrestre é de origem interna e bem semelhante ao produzido por uma barra magnetizada. O eixo desse campo tem inclinação em relação ao eixo de rotação terrestre. As altas temperaturas do interior da Terra não permitem a existência de magnetes permanentes, e, por isso, só as correntes eléctricas podem constituir uma fonte para o campo magnético global.

O campo magnético terrestre é da ordem de $0.4\times10^{-4}T$ na superfície, de acordo com os estudos realizados ao longo dos anos.

A intensidade desse campo vem diminuindo cerca de 0,05% por ano e, nesse ritmo, o campo será anulado antes do ano 4000. Durante a solidificação, certas rochas são magnetizadas segundo a intensidade e direcção do campo existente. Por esta razão o estudo do magnetismo fóssil de rochas antigas permitiu a descoberta de que, ao longo da história da Terra, o seu campo magnético se

anulou diversas vezes por períodos de alguns milhares de anos e até inverteu a sua direcção, passando o pólo sul a ser o pólo norte e vice-versa (o campo inverte de direcção num período médio de aproximadamente 10^4 a 10^5 anos.). Existem hoje cronologias bem detalhadas, que narram as sucessões das inversões do campo magnético.

O campo magnético dipolar da Terra possui um eixo que está inclinado de 12º em relação ao eixo de rotação da Terra, com as linhas de campo a emergirem do pólo magnético norte e a reentrarem no pólo magnético sul.

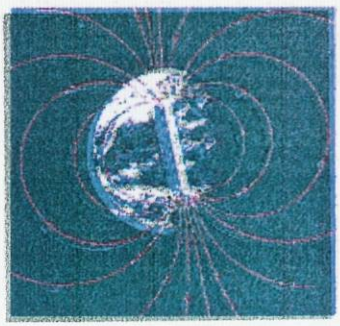


Figura 6.9 – Entrada e saída de linhas do campo terrestre
Retirado de http://www-spof.gsfc.nasa.gov/Education/Intro.html#ix

O alinhamento próximo dos eixos magnético e de spin implicam que a rotação da Terra "ajuda" a produção do campo magnético Os movimentos fluídos na camada metálica exterior (condução eléctrica) acredita-se serem responsáveis pelo campo magnético, tal como um dínamo (o movimento das cargas eléctricas produz um campo magnético).

Apesar da força de um campo magnético dipolar decrescer rapidamente (com $1/r^3$) com a distância r à Terra, atendendo a que a densidade da atmosfera cai exponencialmente, o campo magnético é importante para lá da atmosfera. O domínio do campo magnético terrestre é a Magnetosfera, a qual termina na fronteira da pausa magnética, onde encontra e interage com o vento solar. A magnetosfera tem uma estrutura característica devido ao vento solar empurrar o campo magnético terrestre para longe do Sol. Entre os $8R_\oplus$ e os $10R_\oplus$ para lá da Terra, o campo dipolar é evidente, e para lá existe uma região de transição abrupta.

6.5.4.2 A magnetosfera terrestre

A magnetosfera terrestre contém processos físicos complexos envolvendo plasma e campos electromagnéticos, cuja compreensão ainda há pouco se iniciou. Felizmente, a magnetosfera é próxima e tem sido estudada profundamente desde o inicio da exploração espacial. Serve de modelo para outras magnetosfera do sistema Solar, que foram encontradas em redor de outros planetas e cometas. O ponto fulcral é: a interacção entre o vento solar e a magnetosfera cria um gerador electromagnético planetário que converte a energia cinética do vento solar em electricidade a uma razão de 10^6 megawatts.

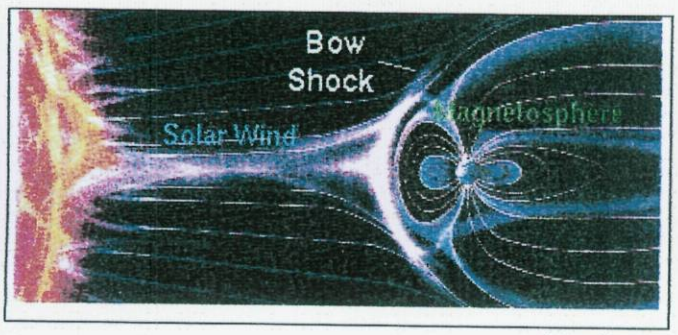


Figura 6.10– A magnetosfera terrestre. O vento solar encontra o campo dipolar terrestre e cria uma onda de fronteira onde termina a magnetosfera. A unidade é o raio terrestre. Retirada de http://www-spof.gsfc.nasa.gov/Education/Intro.html#ix

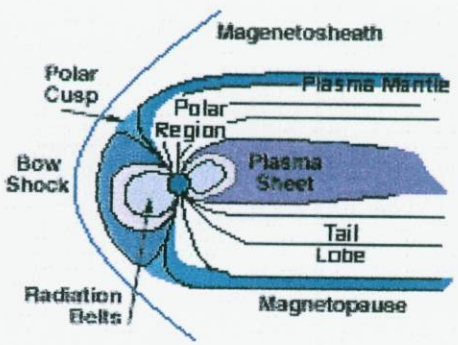


Figura 6.11– Esquema da magnetosfera
Retirada de http://www-spof.gsfc.nasa.gov/Education/Intro.html#ix

A região interior à magnetopausa pode ser dividida em varias regiões:

- ✓ Magnetosfera interna

A magnetosfera interna estende-se desde o "nariz" até à distância de 8 $R_\oplus$ no lado escuro, mas não inclui a região abaixo dos pólos.

É uma região relativamente estável, que contêm a regiões de radiação de Belt interior e exterior. A densidade típica dos iões energéticos é de 1 por

cm^3. A energia destes iões é ~50 KeV e a corrente eléctrica está associada à do plasma rodeando a Terra.

Estes iões são perdidos gradualmente por colisões com o gás neutro ou espalhados das suas órbitas para a atmosfera mais profunda. Estas perdas contudo são compensadas pela ejecção de novo plasma pelo lado escuro, mas tempestades magnéticas.

✓ Folha de plasma

A folha de plasma é uma camada fina de plasma quente centrado no equador da cauda, com uma espessura de 3-7 $R_{\oplus}$, densidade 0.3-0.5 iões/m^3 e com iões de energia 2-5 KeV.

Ao contrário da magnetosfera interior, esta é uma região dinâmica: espessura, densidade e energia sofrem grandes variações e o plasma flui rapidamente entre as várias direcções, particularmente de oeste. A folha de plasma está associada à corrente eléctrica fluindo através do equador de flanco para flanco de Este para Oeste.

✓ Lóbulos da cauda

São duas regiões de regularidade magnética a norte e sul da folha de plasma. As linhas de campo nestas regiões são uniformes e mantêm aproximadamente as suas direcções até convergirem para os pólos. Esta região tem uma densidade reduzida 0.01 iões/m^3, mas contém um campo magnético relativamente forte, porque ocupa um elevado volume e pode suster uma grande quantidade de energia. Muitos acreditam ser o armazém de energia das subtempestades.

✓ Camadas fronteira – são observadas no interior da magnetopausa e a sua espessura é menor do que 1 $R_{\oplus}$. Marcam a transição entre regiões e a sua densidade de plasma é intermediária entre a da magnetosfera e a do vento solar (~2-3 iões/cm^3). Os seus iões parecem provir de ambas as fontes e as suas linhas de campo parecem estar associadas ao campo magnético interestelar.

c) Zona de radiação de Van Allen

A magnetopausa reflecte o vento solar para longe da Terra, mas muitos protões e electrões entram na magnetosfera. Estes são apanhados no campo magnético dipolar terrestre em zonas de radiação toroidal, concêntrica com o eixo

magnético. A descoberta desta zonas (zonas de radiação Van Allen) pelo grupo de James A. Van Allen foi feita através de observações de satélite em 1958.

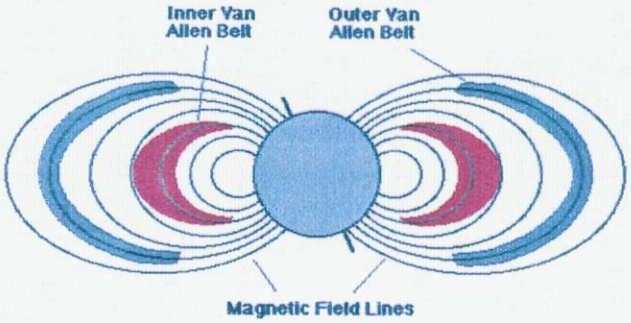


Figura 6.12 – Zonas de Radiação de Van Allen
Retirada de http://www-spof.gsfc.nasa.gov/Education/Intro.html#ix

Os satélites possuem muitos detectores de partículas, que permitiram mapear com detalhe as zonas de radiação. Ambos os protões e electrões também foram encontrados para lá da magnetosfera, em duas zonas características de radiação: (1) a zona mais pequena interior entre $1R_{\oplus}$ e $2R_{\oplus}$, onde os protões têm energias da ordem dos 50 MeV e os electrões energias maiores que 30 MeV. E (2) a zona maior e mais exterior entre $3R_{\oplus}$ e $4R_{\oplus}$, onde os protões e electrões aí concentrados são menos energéticos. A zona interior é relativamente estável, mas a exterior tem um numero de partículas variável de um factor 100. As partículas presas nestas zonas provêm do vento solar e das interacções dos raios cósmicos com a atmosfera superior terrestre.

As partículas carregadas são presas nas zonas de radiação ao longo de linhas de força espirais entre o norte e o sul. As partículas das zonas interiores podem interagir com a fina camada atmosférica superior e produzir as auroras.

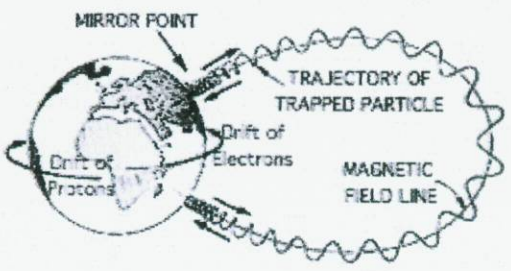


Figura 6.13 – Trajectória das partículas presas no campo
Retirada de http://www-spof.gsfc.nasa.gov/Education/Intro.html#ix

Em adição aos movimentos em espiral e oscilações Norte-Sul, as partículas movimentam-se em correntes devido à diminuição da intensidade da força dos campos magnético e gravítico à medida que aumenta a distância para a Terra.
A uniformidade longitudinal das zonas de radiação, é devida ao movimento dos protões de mais alta energia e dos electrões de baixa energia em direcções opostas..
Se a partícula possui alguma velocidade ao longo de uma linha de campo magnético, a sua trajectória será helicoidal. Uma vez que a energia cinética total da partícula não se altera, o seu movimento ao longo da linha de campo vai eventualmente diminuir, o sentido pode ser alterado se a partícula chocar com outra.

6.5.4.3 As auroras



Figura 6.14 – Várias imagens de auroras

Retiradas de http://www-spof.gsfc.nasa.gov/Education/whaur1.html

A zona de radiação mais interior interage com a atmosfera superior e produz as coloridas auroras: aurora boreal, ou luz do Norte, em elevadas latitudes Norte, e a aurora austral nas elevadas latitudes Sul. Formas luminosas difusas em grandes áreas do céu foram observadas desde tempos antigos nas regiões do Norte em latitude entre 15° e 30° do pólo magnético. As auroras são faixas

vacilantes ou cortinas de luz, ou lindas tapeçarias cuja intensidade e cor (pálidas rosa, azul e verde) se alteram num espaço de horas.

Por medidas de triangulação das auroras dos anos 80, verificou-se que a maioria ocorre entre os 80 e os 160 Km, com poucas acima dos 1000 Km.

As emissões aurorais resultam quando electrões de baixa energia saem da zona de radiação interior e colidem com os gases atmosféricos excitados e ionizados. Quando estes gases excitados, principalmente oxigénio e nitrogénio, voltam às suas formas estáveis, é emitida luz visível nas cores características. O vento solar desempenha um papel importante nas auroras ao fornecer os electrões, ou perturbando a magnetosfera de tal forma que as partículas presas nas zonas de radiação saltam para a atmosfera próximo dos pontos "mirror" (observar a figura 6.13).

A indução da actividade solar foi inferida pelo facto de ser tão forte e estar correlacionada com as auroras.

Modelos recentes das auroras explicam-nas como o resultado da libertação de energia da cauda magnética por um processo designado recombinação magnética. Isto ocorre quando regiões de campos magnéticos opostos se juntam e as linhas magnéticas partem e se recombinam. O local de tais recombinações é a folha de plasma na cauda magnética O ponto de recombinação está aproximadamente a 100 $R_{\oplus}$. O valor do campo magnético nesse ponto é zero. Ocasionalmente, o vento solar fornece energia magnética suficiente à magnetosfera de tal forma que as linhas de campo se quebram e recombinam-se a 15 $R_{\oplus}$. Os pontos de colapso no exterior, ejectando electrões na atmosfera, provocam as emissões aurorais.

Entretanto, uma bolha de plasma contendo linhas de campo livres da atracção magnética da Terra movem-se em colunas descendentes. O equilíbrio da magnetosfera é restabelecido. O processo de recombinação no plasma aplica-se a cometas e outras situações astronómicas.

6.5.5 O campo magnético da Lua

O magnetismo lunar apenas pode ser estudado com provas da superfície da Lua. Os magnetómetros colocados pelos astronautas da Apollo revelam que o campo magnético intrínseco é menor que $10^{-9}T$. No entanto existem fontes

localizadas de magnetismo na Lua da ordem $10^{-8}T$. Mesmo assim o magnetismo global da Lua é muito reduzido, pelo que, considerando o modelo do dínamo para a origem do campo magnético planetário, o núcleo da Lua não pode ser composto principalmente por ferro e níquel, (a densidade da Lua também é muito reduzida para ter um núcleo metálico). Por outro lado, algumas rochas da superfície estão muito mais magnetizadas do que seria de esperar num campo fraco. Os minerais de ferro incrustados nas rochas preservam o campo magnético existente aquando da solidificação. Assim, no passado o campo magnético da Lua deve ter sido muito mais forte do que actualmente.

Pelo facto de o campo magnético lunar ser extremamente fraco, foram uma surpresa os resultados dos estudos efectuados nas rochas trazidas pela Apollo11. Estas rochas mostravam evidências de que tinham sofrido cristalização num campo magnético forte. A opinião inicial foi de que estas rochas adquiriram uma reminiscência secundária (IRM) durante o tempo em que sofreram influência do campo magnético terrestre. Para testar esta hipótese algumas rochas foram desmagnetizadas e enviadas de novo para a Lua na Apollo12. Os resultados desta experiência confirmaram que a reminiscência observada era de facto uma magnetização remanescente natural. O magnetómetro observou na altura também as zonas de crusta com campo remanescente mais intenso, que foi adquirido provavelmente quando a Lua possuía o seu dínamo interno. Os dados sugerem que há 3.9 biliões de anos a intensidade do campo de superfície lunar era de ~1 oersted (~10000nT ou 80 A/m).

Este campo diminuiu gradualmente de intensidade a 1/10 do oersted (~1000nT) em 3.1 biliões de anos. Estes dados parecem estar de acordo com a ideia de que a Lua jovem possuía um núcleo de ferro fundido capaz de sustentar um dínamo regenerativo e que este núcleo ao contrair arrefeceu rapidamente e solidificou há cerca de 3 biliões de anos.

Devido ao campo magnético da Lua ser fraco, o vento solar interage na sua superfície quando a Lua se encontra fora da magnetosfera terrestre. Os rastos de partículas implantados pelo vento solar, nas rochas lunares expostas, gravam a história das flares solares.

6.5.6 Campos magnéticos em Marte

Marte é muito menor do que a Terra (1 R_M=3394 Km), o seu núcleo tendo sensivelmente a mesma dimensão que o núcleo de Mercúrio. Marte deve ter um campo intrínseco entre o momento de dipolo da Terra e o de Mercúrio. As primeiras indicações de que Marte poderia possuir um campo intrínseco surgiram a partir da detecção da barreira de choque pela Mariner 4. Observações posteriores também identificaram essa barreira de choque. Assim, foram aplicados modelos dinâmicos de gás à posição da barreira de choque para determinar as dimensões do obstáculo que a criou. A partir da observação da densidade do vento solar e da sua velocidade fora da barreira de choque, calculou-se que o obstáculo devia ter cerca de 400Km para lá da superfície, que foi assumida como a ionosfera. Contudo a ocultação rádio e as experiências da Mariner 9 demonstraram que a ionosfera apenas tinha uma densidade neglicenciável aos 400Km de altitude. Baseados neste resultado pensou-se que um campo intrínseco estaria a criar o obstáculo detectado como ionosfera. O momento de dípolo suficiente para balançar a média da pressão dinâmica do vento solar aos 400 Km de altitude foi calculado como sendo ~$1.4x10^{12}$ Tm^3.

Os dados recolhidos pelas diferentes missões originaram diferentes teorias para o fraco campo de Marte, que tal como o de Vénus sugeriu a hipótese de ser induzido e não intrínseco.

Contudo Marte pode possuir um campo intrínseco de momento não superior a ~$1.5x10^{12}$ Tm^3 e actualmente considera-se muito próximo de $10^{11}Tm^3$, mais de 100000 vezes menor do que o momento dipolar terrestre.

Mas terá sido o campo sempre assim fraco? Como ainda não se conseguiu que nenhum veículo estuda-se com segurança a superfície de Marte, os estudos paleológicos ainda não são exactos. O estudo efectua-se essencialmente através de meteoritos, mas estes podem ter sido contaminados. Os meteoritos estudados apresentam campos remanescentes que podem ter sido induzidos por um campo remanescente preexistente na crusta marciana, (durante o seu período de dínamo activo, à cerca de 3-4 biliões de anos). No entanto, os resultado são campos superficiais de intensidade 250-1000nT, de acordo com o campo magnético actual de Marte.

O arrefecimento rápido e consequente solidificação do núcleo de Marte parece explicar a presença de um campo intrínseco no passado e a sua ausência hoje.

Em conclusão, Marte possui uma zona livre das partículas do vento solar, exibe variações de polaridade e orientação das linhas interplanetárias de campo que não se encontram nas magnetosferas dos planetas com campos magnéticos intrínsecos.

6.5.7 Campo magnético intrínseco de Júpiter

Observações nos anos 50 em diferentes comprimentos de onda foram a primeira evidência de que o planeta possuía um campo magnético intrínseco. Estudos da radiação de sincrotron permitiram detectar a inclinação, de 9.5º e a variação da inclinação (~200ºW) do dipolo joviano e assim estimar um momento de 11.7 GR_J^3.

As observações do campo magnético de Júpiter foram feitas pela Pioneer10 e Pioneer11. Através dos dados, foram construídos dois modelos, cujos parâmetros são:

	Pioneer10 Model D2	Pioneer11 Model D4
Momento	$4.00GR_J^3$*	$4.23GR_J^3$*
Inclinação do dipolo	10.6º	10.8º
Variação da inclinação	195ºW	201ºW
Deslocamento	$0.11R_J$	$0.10R_J$

*A polaridade do momento é oposta à da Terra mas idêntica à de Saturno.

A magnetosfera de Júpiter é enorme se visível da Terra seria maior que a Lua cheia. Isto está de acordo com o enorme momento de dipolo (~4000 vezes maior que o da Terra) e a pressão do vento solar é aproximadamente 27 vezes menor a 5.2 UA do que a 1 UA. A barreira de choque situa-se algures a 70 R_J do planeta, mas a distância pode variar $30R_J$ com as alterações das condições do vento solar. Dentro da barreira existe uma bainha de plasma solar turbulento em redor da magnetopausa 50 R_J. No interior da magnetopausa existe uma magnetosfera rica em plasma movimentando-se a velocidades supersónicas.

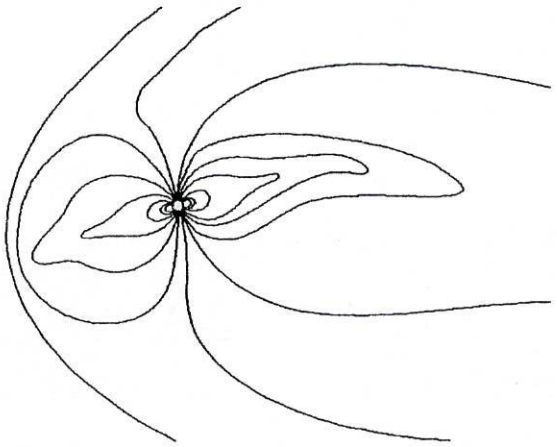


Figura 6.11 Magnestofera de Júpiter

Adaptada de http://www-spof.gsfc.nasa.gov/Education/wmfield.html

Mais próximo à co-rotação do plasma do planeta as velocidades são subsónicas e os satélites podem varrer para fora das suas vigílias pequenas cavidades que orbitam. A fonte final do plasma é Io. As erupções de gases dos vulcões e vapores de metal, tais como dióxido do enxofre e o sódio, estas espécies são ionizadas e são espalhados no espaço para dar forma a um toro em torno de Júpiter. Este toro é alinhado com o equador magnético e é ~20.5° inclinado em relação à órbita de Io. Iões de enxofre, de oxigénio e de sódio são difundidos para fora da magnetosfera e combinam-se com os iões de oxigénio e hidrogénio que saem das superfícies dos satélites gelados. O toro do plasma de Io tem um raio aproximadamente $5.9R_J$ e uma secção transversal de ~$1R_J$. A intensidade da radiação no toro flutua muito. A Voyager 2 observou um aumento de factor 2 na intensidade da radiação sobre medidas da Voyager 1 e na temperatura do plasma de 100 000 a 60 000K. A magnetosfera interna é dominada por electrões presos e protões que se combinam para produzir uma radiação ambiente letal.

A emissão de rádio de Júpiter é dominada pela radiação do sincrontron (decímetro) das partículas energéticas presas. Estes electrões acelerados emitem então a radiação de frequência característica (~40 megahertz), as emissões apenas acontecem quando Io está numa posição específica da sua órbita. Os electrões acelerados precipitam também, ao longo das linhas na atmosfera de Júpiter para produzir a aurora polar brilhante.

Pensa-se que o dínamo joviano opera dentro de uma camada de hidrogénio metálico líquido no interior do planeta. O hidrogénio a alta pressão torna-se um líquido, e à medida que as pressões são mais elevadas a abertura entre a faixa de condução (vazia) e a banda molecular orbital preenchida são reduzidas, permitindo que o líquido se comporte como um condutor metálico. A convecção

nesta camada que se estende a 0,8 raios planetários em Júpiter, teoricamente é responsável pelo campo magnético de Júpiter.

6.5.8 Campo magnético intrínseco de Saturno

O campo magnético de Saturno foi identificado pela primeira vez pela nave espacial Pioneer11 durante o seu voo em Setembro 1979 e investigado subsequentemente em mais detalhe pela Voyager 1 em Novembro 1980 e pela Voyager 2 em Agosto 1981. O dipolo encontrado teria um momento de ~$0.2GR_S^3$ (R_S = 60330km) e polaridade oposta à da terra (a mesma polaridade que o campo de Júpiter).

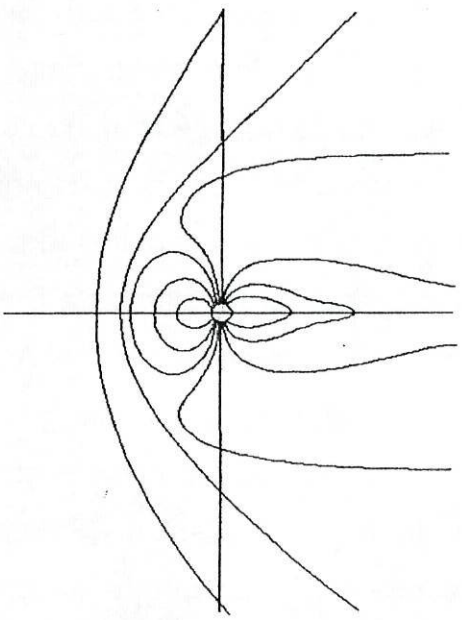


Figura 6.12 Magnetosfera de Saturno

Adaptada de http://www-spof.gsfc.nasa.gov/Education/wmfield.html

A assimetria do campo de Saturno parece contradizer não somente as observações de emissões de rádio periódicas, mas mais importante parece violar o teorema de Cowling, que não permite a geração de um campo magnético com simetria axial perfeita. Contudo, há modelos que permitem que um campo magnético seja estável com uma inclinação de apenas 0.5°. A nave espacial Cassini, deverá chegar ao planeta em Julho de 2004, conduzirá um exame exaustivo do campo magnético de Saturno. A sua excursão orbital, usando Titan como uma alavanca gravitacional para comutar órbitas, estudará latitudes magnéticas muito elevadas e poderá dar-nos um retracto mais claro da verdadeira geometria do campo.

A simetria axial do campo origina uma magnetosfera extremamente regular. A curva de choque situa-se a ~30R_S ao longo da linha do Sol-planeta mas pode flutuar até 10R_S em resposta à variação da pressão do vento solar. Durante os três dias que Voyager 2 gastou na vizinhança de Saturno a magnetosfera expandiu aproximadamente 70%. A magnetopausa encontra-se a ~20R_S, mesmo fora da órbita de Titan. Durante períodos de actividade solar elevada a magnetopausa é comprimida e a atmosfera de Titan é exposta directamente ao plasma do vento solar.

Dentro da magnetopausa há três populações distintas de partículas. Para fora a ~3R_S há um toro de plasma composto na maior parte por iões de O^+, que se pensa serem o resultado de espalhamento da energética radiação de ionização pelas superfícies das luas geladas de Saturno. Fora deste toro há um anel de iões energéticos de H^+ que forma um toro muito maior de hidrogénio neutro centrado na órbita de Titan. A fonte de hidrogénio neutro é a atmosfera de Titan, em que o gás é perdido seguindo a fotodecomposição do metano. Este gás é ionizado para produzir a população dos iões vista na magnetosfera média.

A densidade do plasma na magnetosfera distante de Saturno é mais baixa do que foi previsto, dado a força do seu campo magnético. A absorção pelo sistema do anel a girar parece ser o mecanismo dominante, que remove as partículas carregadas da magnetosfera interna. Isto, em combinação com a absorção por satélites e pela atmosfera do hemisfério sul de Saturno (onde o campo é geralmente mais fraco), cancela eficazmente a magnetosfera interna das partículas que circundariam em torno das linhas locais do campo e emitiriam a radiação do ciclotron ou do sincrotron na sua girofrequência característica. A fraqueza destas emissões é a razão porque o campo magnético de Saturno não foi identificado antes de 1979, apesar dos esforços repetidos. A radiação quilométrica de Saturno, devido à emissão do ciclotron do electrão, foi observada numa frequência ligeiramente mais baixa do que a radiação quilométrica terrestre em consequência do campo magnético mais forte. Estas emissões intensas em 50kHz a 1MHz vêm de uma fonte situada aproximadamente a 80°N no planeta, com uma potência de ~10^{10}W (comparado com o 10^8W para a emissão quilométrica terrestre). Uma similar, embora fraca, fonte foi detectada também no hemisfério do sul. Estas fontes permanecem fixas em relação ao Sol mas são moduladas fortemente na intensidade com um período de 10 horas 39

minutos e 24±7 segundos, um período inferido para ser a taxa da rotação do interior do planeta. A origem desta modulação ainda não foi identificada.

6.5.9 Campo magnético intrínseco de Urano

A resposta à pergunta se Urano tinha ou não o seu próprio campo magnético era duvidosa antes do voo da nave espacial Voyager2, em 24 de Janeiro de 1986. As observações feitas em 1979 de emissões de Lyman-α foram interpretadas como a precipitação de partículas carregadas numa magnetosfera activa, e as estimativas da intensidade de campo variaram de 0 a 10 gauss!

As primeiras sugestões de um campo magnético vieram da Voyager2, cinco dias antes da aproximação mais próxima, a uma distância radial de $275R_U$. Atravessando a barreira de choque e a magnetopausa foram detectadas emissões de onda de rádio em 31,1 e 56.2kHz. O cruzamento da magnetopausa foi caracterizado por um aumento na densidade do fluxo, de ~0.1nT para um valor de 7nT. A força do campo aumentou intensamente atingindo um máximo de 413nT. Mais próximo do planeta, a força do campo caiu aproximadamente com R^{-3}, até um valor de 8nT. A nave espacial observou um campo realçado pela presença de correntes significativas através da cauda magnética; durante a passagem ao longo do "magnetotail".

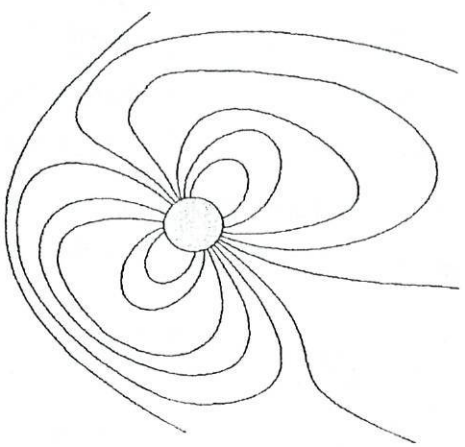


Figura 6.13 Magnetosfera de Urano

Adaptada de http://www-spof.gsfc.nasa.gov/Education/wmfield.html

A estrutura da magnetosfera de Urano e o ambiente de plasma de Urano foram razoavelmente bem caracterizados. A combinação da grande inclinação do dipolo e da inclinação muito grande do vector da rotação (97.9°) significa que o ângulo entre o eixo do campo do dipolo e a normal da linha Sol-planeta varia

somente entre 22° e 38° (comparáveis à Terra). Em consequência, a magnetosfera de Urano é notavelmente similar, na sua forma, à magnetosfera terrestre, possuindo uma cauda magnética bipolar com os lóbulos separados por correntes transversais da cauda e por uma folha neutra do plasma. Entretanto o campo está a girar em torno da linha planeta-sol (algo que a magnetosfera terrestre não faz) de modo que as linhas do campo na cauda se tornam torcidas em hélices. O campo gira em relação ao campo magnético interplanetário. A velocidade e a densidade do vento solar (464km/s e $0.05cm^{-3}$, respectivamente) antes do cruzamento da curva de choque dão um valor para a pressão do vento solar (P_0) igual a $1.8x10^{-10}$dyne cm^{-2}. A conclusão suportada por medições na folha do plasma, era que a magnetosfera de Urano se tinha submetido muito recentemente a uma compressão em consequência de uma tempestade magnética. Embora nenhuma assinatura magnética da actividade da tempestade fosse vista pela Voyager2 na magnetosfera do planeta, as mudanças da força do campo durante cruzamentos consecutivos da folha do plasma eram indicativas da relaxação da tempestade.

6.5.10 Campo magnético intrínseco de Neptuno

Antes do voo da Voyager2, não havia indicações precisas da existência do campo magnético de Neptuno. Apesar disso desde os anos 70 que foi assumido que Urano e Neptuno, na teoria, deviam ser capazes de gerar campos internos.

As evidências de um campo magnético surgiram com as observações feitas em 1989, das ondas de plasma, quando a Voyager2 se aproximou de Neptuno. A Voyager2 colectou diversos dados que permitiram explanar diversos modelos para o observado.

A orientação do campo magnético de Neptuno tem consequências interessantes para a sua magnetosfera. Devido à elevada inclinação do campo, a magnetosfera quase toca a linha planeta - Sol. Quando a Voyager2 entrou na magnetosfera pela extremidade polar, o eixo do campo estava apenas a 14° da linha Sol- planeta. A magnetosfera de Neptuno é descrita como a mais "vazia" do sistema solar, devido à reduzida pressão do plasma. A absorção de partículas carregadas na magnetosfera por corpos sólidos e pelos anéis é significativa, tal como em Urano. Vê-se assim um grande número de partículas energéticas próximo do planeta. Foi identificada uma população de iões N^+ e H^+ originados

em Triton e teorizou-se ser este a fonte de grande parte do plasma da magnetosfera de Neptuno. O gradiente de densidade indica entradas em espiral e precipitação nos anéis e na atmosfera de Neptuno.

6.5.11 Comparação dos campos de Urano e Neptuno

Os campos magnéticos de Urano e Neptuno têm muito mais em comum entre si, do que os campos de outros planetas magnetizados intrinsecamente. Cada um é caracterizado por uma grande inclinação de dipolo e um razoável desvio. Os campos de Urano e Neptuno têm manifestações idênticas a nível da superfície. Ambos são mais intensos no pólo Sul a latitudes médias, e a intensidade do campo à superfície é comparável nos dois (0.1 –1.1 Gauss em Urano e 0.1 –0.9 Gauss em Neptuno). Ambos os planetas têm grandes áreas com campo relativamente fraco através das suas superfícies, mostrando uma estrutura multipolar distinta. Ambos têm visíveis auroras a grandes distâncias angulares dos pólos de rotação.

O facto de ambos os campos serem similares sugere que a origem das inclinações dos dipolos esteja relacionada com os interiores dos dois planetas.

6.6 Campos magnéticos na formação estelar

Observações de um astrónomo da universidade de Illinois, Richard Crutcher, demonstraram que os campos magnéticos são um componente de controle critico na formação de estrelas.

Persistem dois problemas na compreensão da formação estelar. Primeiro a pressão externa das reacções termonucleares no núcleo balança a pressão da gravidade. Numa nuvem molecular, outras forças devem actuar para suster a nuvem contra a sua própria gravidade. Caso contrário a nuvem colapsava em estrelas à muito tempo.

O segundo problema envolve a transferência do excesso de momento angular de uma estrela em formação. Quando a nuvem colapsa em estrelas, o material roda cada vez mais rápido – como uma patinadora no gelo que fecha os braços. Teoricamente foram feitas diversas simulações que mostram como uma nuvem interestelar colapsa na presença de um campo magnético. Nesses estudos, os investigadores podem predizer como as nuvens colapsam rapidamente para

formar estrelas e como se livram do momento angular em excesso criando campos magnéticos suficientemente fortes. Pelas medições dos campos magnéticos em 27 nuvens interestelares, Crutcher, comparou a energia magnética de cada com a energia gravitacional e descobriu que, os campos magnéticos têm intensidade suficiente para controlarem a razão de colapso e assistir ao processo de formação estelar, fornecendo o meio para retirar o momento em excesso. A intensidade do campo magnético é suficiente para impedir a nuvem de colapsar. A energia gravitacional é o dobro da intensidade da energia magnética, mas esta também suporta indirectamente a nuvem, através da turbulência magnética. A turbulência fornece a força adicional que se opõe à queda da gravidade e fornece o mecanismo de transferência do momento angular da estrela em formação para o envelope envolvente de gás e poeira.

6.7 Campos magnéticos estelares

Estamos acostumados com o facto de a Terra ter um campo magnético cuja forma se torna cada vez mais fechada em campo de dipolo, com o eixo magnético não muito diferente do eixo de rotação. Isto deixa a suposição que o magnetismo está relacionado com a rotação da Terra. Podemos no entanto questionar se as estrelas possuem velocidades de rotação muito mais elevadas que a Terra, então podem ter campos magnéticos mais fortes que a Terra. Parece interessante de verificar. Mas surge a questão: Como medir o campo magnético de uma estrela? Não podemos colocar um magnetómetro na superfície da estrela. Tudo o que obtemos da estrela é luz. Felizmente a natureza da luz forneceu um efeito do campo magnético na luz que pode ser usado para medir os campos magnéticos das estrelas. Este efeito é o efeito de Zeeman, assim designado após a sua descoberta.

O desdobramento das linhas aumenta à medida que aumenta a intensidade do campo magnético Em 1908 Hale, usou o efeito de Zeeman para medir a intensidade do campo nas manchas solares.

Apenas para uma fracção reduzida de estrelas para as quais se pode medir o campo, este varia de uma forma periódica.

6.7.1 Efeito de Zeeman

Zeeman descobriu que para uma fonte de luz de laboratório que emite uma risca de emissão no espectro num campo magnético de laboratório, as riscas espectrais geralmente dividem-se nos diversos componentes. Se se observar a luz numa direcção arbitraria relativamente à direcção do campo magnético, no caso mais simples, pode-se ver a risca dividida em três componentes, o tripleto de Lorentz. O componente central permanece no λ original λ_0, que a linha possuía sem o campo magnético. Os outros dois componentes surgem simetricamente dos dois lados da componente central. A frequência de dispersão $\Delta\upsilon$ é dada por

$\Delta\upsilon = \pm\frac{e}{m}\times\frac{H}{4\pi c} = 4.66\times10^{-5}\times H$, com $\upsilon = \frac{1}{\lambda}$ ou exprimindo em termos de $\Delta\lambda$,

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta\upsilon} = \frac{d}{d\upsilon}\left(\frac{1}{\upsilon}\right) = -\frac{1}{\upsilon^2} = -\lambda^2$$

$$\Delta\lambda = \pm\lambda^2\times4.7\times10^{-5}\times H$$

onde H é o valor do campo magnético medido em Gauss, e é a carga eléctrica medida em unidades electromagnéticas, m é a massa electromagnética.

As transições entre diferentes níveis de energia, associadas às riscas espectrais na presença de um campo magnético sofrem desdobramento.

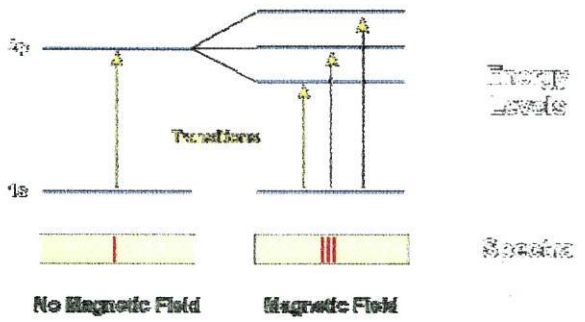


Figura 6.14 – O efeito de Zeeman

Retirada de http://csep10.phys.utk.edu/astr162/lect/light/zeeman-split.html

Capítulo 7 - Escalas e distâncias

7.0 Introdução

Neste capítulo apresentam-se as unidades de distância e escalas utilizadas no estudo o Universo, caracterizando as mesmas bem as como as relações entre elas.

7.1 Unidades de distância no Universo

A enorme vastidão do Universo não torna cómodo o uso das unidades que habitualmente utilizamos para medir distâncias: milímetros, centímetros, metros ou mesmo quilómetros.

A Terra é um corpo de enormes dimensões, no Universo, porém, há corpos com dimensões muito maiores do que as da Terra. Por exemplo, o volume do Sol é um milhão de vezes maior do que o da Terra e, no entanto, o Sol é considerado uma estrela média; as chamadas estrelas supergigantes são aproximadamente 500 vezes maiores do que o Sol.

Estas informações podem surpreender um pouco, pois quando observamos o céu, todos os astros nos parecem «pontos». Tal acontece, no entanto, porque as distâncias entre os vários astros são extraordinariamente grandes.

Se decidirmos escrever a distância da Terra ao Sol em metros seremos confrontados com um número de difícil leitura e por isso pouco expressivo:

Distância da Terra ao Sol = 149 600 000 000 m

No entanto, se analisarmos outros exemplos a situação tende a complicar-se ainda mais:

Astros do Sistema Solar	Distância média entre os astros
Mercúrio – Sol	60 000 000 000 m (60 milhões de Km)
Plutão – Sol	6 000 000 000 000 m (6000 milhões de Km)
Terra – Lua	384 000 000 m (384 000 Km)

Apesar de serem grandes as distâncias entre os astros que constituem o Sistema Solar, bem maiores são as distâncias que separam a Terra de outras estrelas. Por exemplo: a distância que separa a Terra da Estrela Alfa de

Centauro, a estrela mais próxima de nós depois do Sol, é aproximadamente $4{,}08X10^{12}$ Km; a distância Terra – estrela Vega é de $2{,}5X10^{14}$ Km.

Perante distâncias tão grandes, não é cómodo o uso das unidades habituais. As unidades mais utilizadas para este tipo de medidas:

- *A unidade astronómica* (símbolo: *UA*);
- *O ano-luz* (símbolo: *a.l.*);
- O *parsec* (símbolo: *pc*).

A *unidade astronómica* é igual à distância média entre o Sol e a Terra, ou seja:
1 UA = 150 000 000 Km = $1{,}5 \times 10^8$ Km

A unidade astronómica utiliza-se principalmente para exprimir distâncias no Sistema Solar. Assim, em vez de dizermos que a distância média que separa o planeta Plutão do Sol é de 6000 milhões de quilómetros, dizemos simplesmente que é cerca de 40 UA, pois tal distância é cerca de 40 vezes a distância média Terra – Sol.

O *ano-luz* é igual à distância percorrida pela luz no espaço vazio (onde esta se desloca à velocidade de 300 000 Km/s), durante um ano:

1 a.l. = 300 000 Km/s X 365 X 24 X 3600 s

1 a.l.= 9 500 000 000 000 Km = $9{,}5X10^{12}$ Km

O ano-luz utiliza-se, principalmente, para exprimir distâncias maiores que as observadas no Sistema Solar.

O *parsec* (abreciatura de parallax second); simboliza-se por pc.
Diz-se que a distância do Sol a uma estrela é 1 parsec, se o ângulo de paralaxe da estrela tiver amplitude de 1" (1 segundo).

1 pc = 31 000 000 000 000 Km = $3{,}1 \text{ X } 10^{13}$ Km

1 pc = 3,26 a.l.

Com alguma frequência são usadas em astronomia unidades ainda maiores:

- O quiloparsec 1 Kpc = 1000 pc = 10^3 pc
- O megaparsec 1 Mpc = 1 000 000 pc = 10^6 pc
- O gigaparsec 1 Gpc = 1 000 000 000 pc = 10^9 pc

7.2 Escalas

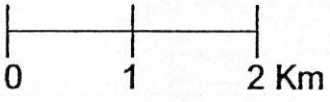
Para a representação esquemática, por exemplo, do Sistema Solar, com distâncias que sejam directamente proporcionais às distâncias reais, terá de se escolher uma escala apropriada, pois de contrário corre-se o risco de não se dispor de material suficiente para essa representação.

Escala é a relação entre uma distância real e a respectiva distância representada no modelo (papel, maquete,...). Uma escala pode ser definida numérica ou graficamente.
Uma escala numérica pode ser, por exemplo:

1/500 000

que se deve ler « um para quinhentos mil» e que significa que uma distância de 1 cm no papel representa 500 000 cm na realidade; ou que 1 m no papel representa 500 000 m na realidade; etc

Uma escala gráfica é definida com um pequeno segmento de recta onde se indica que um dado comprimento no papel corresponde a uma dada distância na realidade. Por exemplo:



significa que uma distância no papel igual à apresentada na escala entre 0 e 1 corresponde a 1 Km na realidade.

Além da representação gráfica, recorre-se muitas vezes a modelos, devendo estes ter também a respectiva escala, para serem proporcionais à realidade.

7.3 Como medir a distância entre a Terra e os astros próximos?

Os primeiros astrónomos achavam extremamente difícil medir as distâncias entre a Terra e outros astros, como, por exemplo, as estrelas.

As medições que efectuavam baseavam-se em métodos puramente geométricos. Já conheciam perfeitamente as posições de algumas estrelas, mesmo antes da invenção do telescópio.

A distância entre a Terra e os astros próximos pode, ainda hoje, ser calculada pelo método geométrico de triangulação, que é um método relativamente simples.

De seguida descreve-se um exemplo, deste método aplicado a situação simples:

- Quatro amigos juntaram-se e decidiram determinar a largura do rio que passa junto a suas casas.

Para tal, estabeleceram o seguinte plano:

- ✓ Escolheram um ponto fixo de referência (um rochedo), junto á margem oposta;
- ✓ A Ana (A) colocou-se mesmo em frente, na perpendicular do rochedo, e também junto à margem;
- ✓ O Bernardo (B) colocou-se também junto à margem, a uma distância da Ana que o grupo tinha escolhido ao acaso (30m);
- ✓ A Catarina (c) também se coloco junto à margem, a uma distância do Bernardo, que foi de novo escolhida ao acaso (5m);

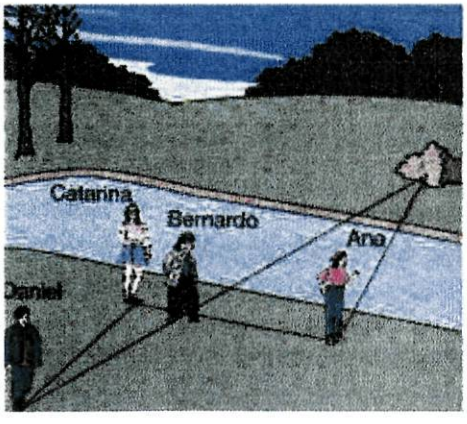
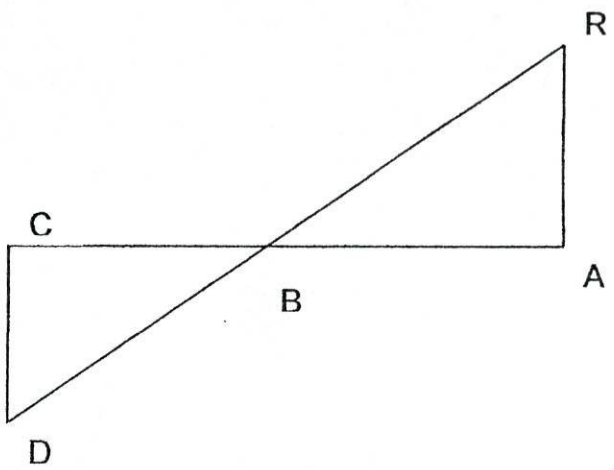


Figura 7.1– As diferentes posições
Retirada do manual do 8º ano de escolaridade

- ✓ O Daniel (D) teve mais trabalho para se posicionar: colocou-se perpendicularmente à Catarina e de tal forma que, ao olhar para o Bernardo, este ficasse mesmo em frente do rochedo que tinham escolhido para referência;
- ✓ Nesta altura, a Ana, que já estava disponível, foi medir a distância entre a Catarina e o Daniel (20m);
- ✓ Em seguida o grupo passou aos cálculos, com a ajuda de um esquema geométrico que o Daniel se lembrou de elaborar;
- ✓ O grupo reparou que os triângulos RAB e DCB são semelhantes e por isso estabeleceu a seguinte relação:

$$\frac{\overline{AR}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{CD}}{\overline{BC}}$$



Esquema geométrico elaborado pelo Daniel

- ✓ Por fim, a partir desta relação, facilmente obtiveram o valor da largura do rio:

$$\frac{\overline{AR}}{30} = \frac{20}{5} \Leftrightarrow \overline{AR} = 120m$$

Neste método construímos dois triângulos e, por considerações geométricas podemos calcular a distância pretendida.

No entanto, pode-se chegar ao mesmo resultado apenas com o triângulo maior. Para isso é necessário medir o vértice B e sabendo a relação trigonométrica que existe entre esse ângulo e os dois catetos do triângulo, ou então, fazendo um esquema de escala apropriada, determina-se a distância pretendida.

É este método que os astrónomos usam para determinar as distâncias às estrela que estão relativamente perto de nós. Porém como se trata de distâncias bastante grandes, a linha de base (distância conhecida) deve ser a maior possível. Para um observador terrestre, essa linha de base é o diâmetro da órbita da Terra.

7.4 Determinação da distância de uma estrela

À medida que a Terra se move em volta do Sol, uma dada estrela parece mudar de posição em relação ao plano de fundo de estrelas mais distante.

O método da paralaxe é utilizado para calcular as distâncias das estrelas mais próximas. Em dada altura, a posição de uma estrela é cuidadosamente determinada, em relação a outras estrelas. Seis meses mais tarde, a translação da Terra deslocou os telescópios de meia volta em redor do Sol, então a posição da estrela é medida novamente.

As estrelas próximas parecem deslocar-se de um lado para o outro relativamente às estrelas mas distantes, à medida que a Terra se desloca em redor do Sol. A observação da aparente mudança de posição da estrela, quando a estrela é observada em posições opostas da órbita da Terra é denominada de paralaxe da estrela. A distância da estrela é calculada através do ângulo de paralaxe, que é metade da aparente mudança de posição angular da estrela.

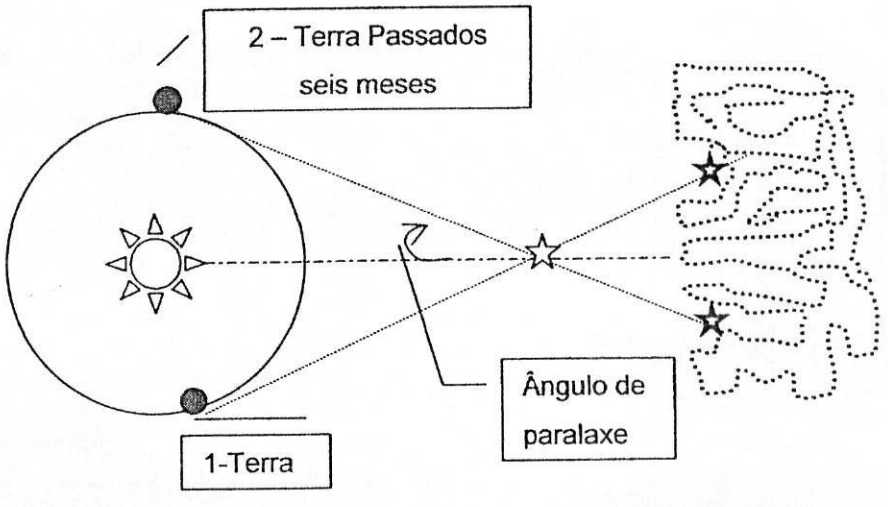


Figura 7.2 - Paralaxe estelar. Uma estrela observada de diferentes posições da órbita da Terra aparenta ocupar diferentes posições.

As paralaxes estelares são muito pequenas e por isso medidas em segundos de arco (''), em que 1'' = 1/360º . Uma caixa de aspirinas aparentará um diâmetro de 1''. Se for vista a uma distância de dois quilómetros. As paralaxes das estrelas próximas são menores do que 1''.

Um parsec (pc), é a distância a uma estrela imaginária cuja paralaxe é de 1'' (um segundo de arco). Um parsec é aproximadamente 31 triliões de quilómetros ou 3.26 anos-luz.

Para se calcular a distância a uma estrela, a que foi medida a paralaxe, usa-se a expressão:

d(pc)= 1/paralaxe da estrela ('')

A paralaxe das estrelas diminui com a distância da estrela. Pode ser medida até valores da ordem dos 0.01'', correspondente a uma distância de 100 pc. No entanto, apenas se pode medir a paralaxe de uma fracção reduzida de estrelas.

O satélite Hipparcos, que é um satélite utilizado para calcular com precisão a paralaxe das estrelas, fê-lo para cem mil estrelas exactamente e para outras quatrocentas mil menos precisamente.

Outros métodos indirectos podem ser utilizados para calcular as distâncias das estrelas para lá dos 100 pc.

Capítulo 8 - Localizar astros

8.0 Introdução

Neste capítulo será feita uma apresentação de diferentes sistemas de coordenadas e a sua utilização para a localização de um astro no céu.

8.1 A Esfera Celeste

Observando o céu numa noite estrelada, não podemos evitar a impressão de que estamos no meio de uma grande esfera incrustada de estrelas. Isso inspirou, nos antigos gregos, a ideia do céu como uma *Esfera Celeste*.

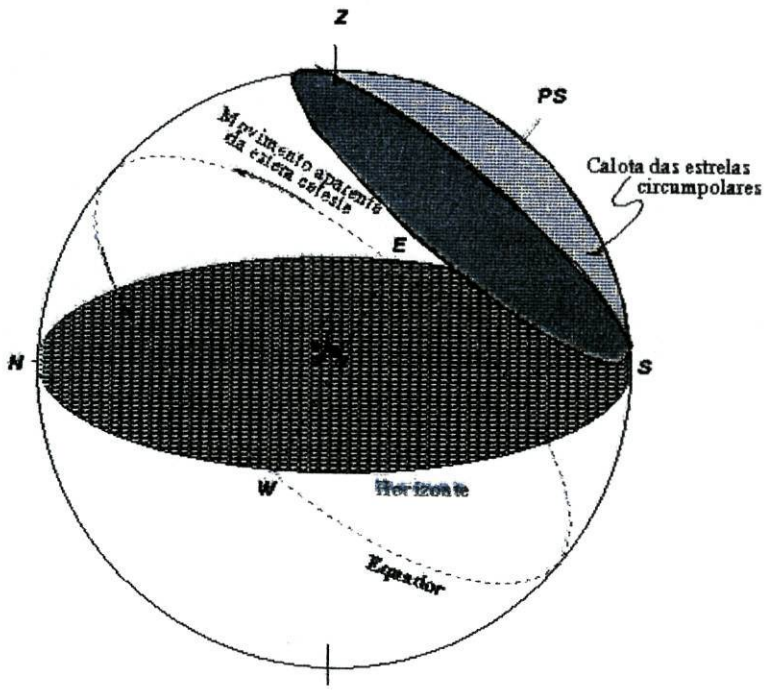


Figura 8.1 – A esfera celeste
Retirada de http://pcastro7.if.ufrgs.br

Com o passar das horas, os astros movem-se no céu, nascendo a leste e pondo-se a oeste. Isso causa a impressão de que a esfera celeste está a girar de leste para oeste, em torno de um eixo imaginário, que intercepta a esfera em dois pontos fixos, os *Pólos Celestes*. Na verdade, esse movimento, chamado *movimento diurno dos astros*, é um reflexo do movimento de rotação da Terra, que se faz de oeste para leste. O eixo de rotação da esfera celeste é o

prolongamento do eixo de rotação da Terra, e os pólos celestes são as projecções, no céu, dos pólos terrestres.

Embora o Sol, a Lua, e a maioria dos astros, na nossa latitude, tenham nascer e ocaso, existem astros que nunca nascem nem se põem, permanecendo sempre acima do horizonte. Se pudéssemos observá-los durante 24 horas, veríamo-los descrevendo uma circunferência completa no céu, no sentido anti-horário. Esses astros são chamados *circumpolares*. O centro da circunferência descrita por eles coincide com o Pólo Norte Celeste. Para os habitantes do hemisfério sul, as estrelas circumpolares descrevem uma circunferência em torno do Pólo Sul Celeste. As estrelas que são circumpolares diferem em cada um dos pólos pois o facto de uma estrela ser circumpolar ou não depende da latitude do lugar de observação.

Devido ao movimento aparente da esfera celeste, um observador situado, por exemplo, no hemisfério norte, olhando na direcção de cada um dos pontos cardeais reconhecerá que:

- a sul, as estrelas movem-se, lentamente da esquerda para a direita;
- a oeste (poente), as estrelas descem gradualmente e vão mergulhando no horizonte;
- a este (nascente), as estrelas vão subindo, observando-se o aparecimento de outras, até aí ocultas abaixo do horizonte;
- a norte, as estrelas rodam, em torno do pólo celeste norte (quase coincidente com a estrela polar), no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio.

Também se nota que as estrelas se deslocam em conjunto, mantendo as suas posições relativas. O movimento aparente da esfera celeste é relativamente lento. Por isso é mais fácil de notar se tivermos pontos que sirvam de referência. Por exemplo, a copa de uma árvore, a aresta de uma casa, etc. Neste caso, em alguns minutos notaremos que uma determinada estrela já não está na mesma posição, relativamente à referência escolhida.

Os antigos definiram alguns planos e pontos na esfera celeste, que são úteis para a determinação da posição dos astros no céu.

Da intersecção de planos com a esfera podem resultar:

- *círculos máximos*, se os planos passarem pelo centro da esfera;

- *círculos menores*, se os planos não passarem pelo centro.

Os pontos de intersecção da esfera com a vertical do observador são:

- ✓ *Zénite (Z):* ponto no qual a vertical do lugar (perpendicular ao horizonte) intercepta a esfera celeste, acima da cabeça do observador.
- ✓ *Nadir (N)*: ponto diametralmente oposto ao Zénite. Ou seja, o ponto de intersecção da vertical do lugar com a esfera celeste exactamente abaixo do observador.

Os planos e correspondentes círculos de intersecção tomam a mesma designação. De entre eles temos:

- ✓ *Horizonte:* o círculo máximo perpendicular à vertical do observador. O plano tangente à Terra no lugar em que se encontra o observador. Como o raio da Terra é desprezável frente ao raio da esfera celeste, considera-se que o Horizonte é um círculo máximo da esfera celeste, ou seja, passa pelo seu centro.
- ✓ *Planos verticais*: círculos máximos contendo a vertical.
- ✓ *Círculos de altura*: círculos menores resultantes da intersecção da esfera por planos paralelos ao horizonte.

Os pontos de intersecção da esfera com o eixo de rotação da Terra são:

- ✓ *Pólo Norte Celeste (PNC):* ponto em que o prolongamento do eixo de rotação da Terra intercepta a esfera celeste, no hemisfério norte.
- ✓ *Pólo Sul Celeste (PSC):* ponto em que o prolongamento do eixo de rotação da Terra intercepta a esfera celeste, no hemisfério sul.

Também temos:

- ✓ *Equador Celeste*: círculo máximo (paralelo) que obtemos reflectindo o equador terrestre sobre a abóbada celeste.
- ✓ *Círculo vertical*: qualquer semicírculo máximo da esfera celeste contendo a vertical do lugar. Os círculos verticais começam no Zénite e terminam no Nadir.
- ✓ *Ponto Norte Geográfico*: ponto em que o círculo vertical que passa pelo Polo Norte Celeste intercepta o Horizonte. É também chamado *Ponto Cardeal Norte*.

- ✓ *Ponto Sul Geográfico*: também chamado *Ponto Cardeal Sul*, é o ponto em que o círculo vertical que passa pelo Polo Celeste Sul intercepta o Horizonte..
- ✓ *Círculos horários*: círculos máximos contendo a direcção PNC-PSC.
- ✓ *Paralelos*: círculos menores resultantes da intersecção da esfera por planos paralelos ao equador.

O mais importante dos círculos horários é o Meridiano.

- ✓ *Meridiano*: circulo horário que contém a vertical do observador. A linha Leste-Oeste é obtida traçando-se, sobre o Horizonte, a perpendicular ao meridiano Coincide com o plano vertical que contém a direcção PNC-PSC. O Meridiano intersecta o horizonte segundo a direcção Norte-Sul (N-S).

O mais importante dos planos verticais é o 1º vertical que é o plano vertical perpendicular ao meridiano. O 1º vertical intersecta o horizonte segundo a direcção Este-Oeste (E-W).

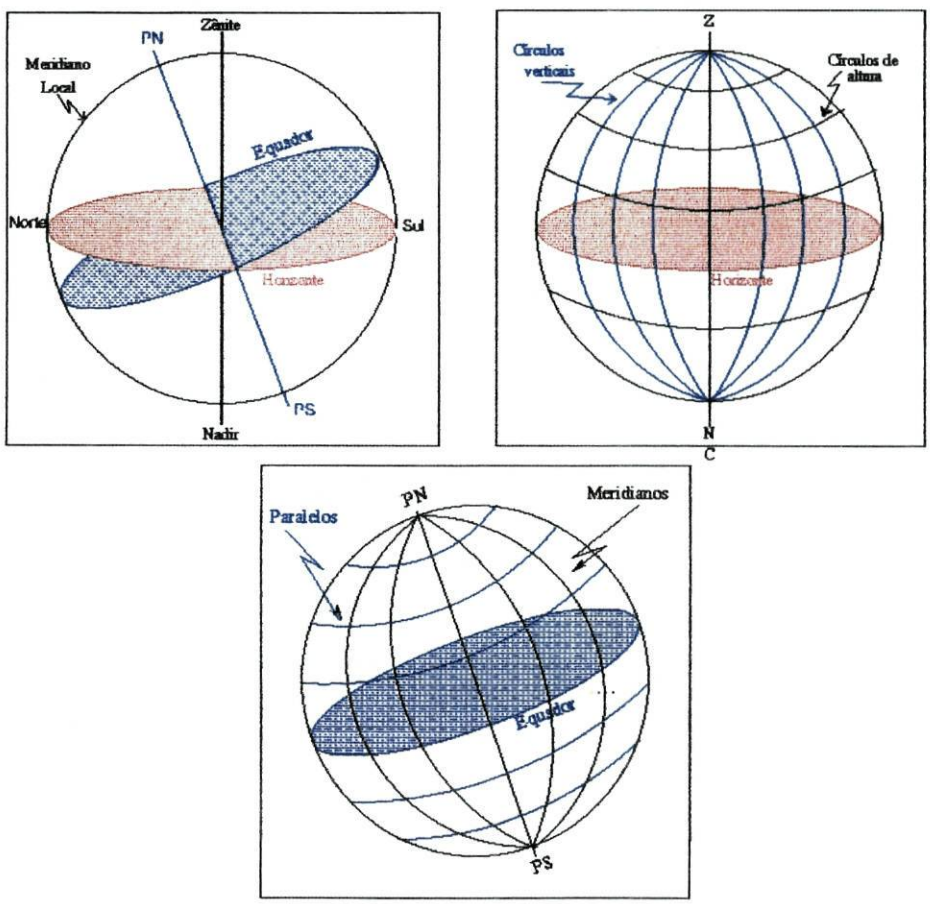


Figura 8.2 – A esfera celeste e alguns círculos e planos
Retirada de http://pcastro7.if.ufrgs.br/index.htm

Eclíptica: É um circulo que corta a abóbada celeste e é determinada pelo caminho aparente que o Sol percorre no céu ao longo do ano. Corta o equador celeste em dois pontos. O mais importante o *Ponto Vernal*, que é atravessado pelo Sol no equinócio da Primavera no hemisfério Norte (20-21 de Março). Utilizando o ponto Vernal e o equador podemos mapear a abóbada celeste e assim localizar qualquer estrela sobre ela.

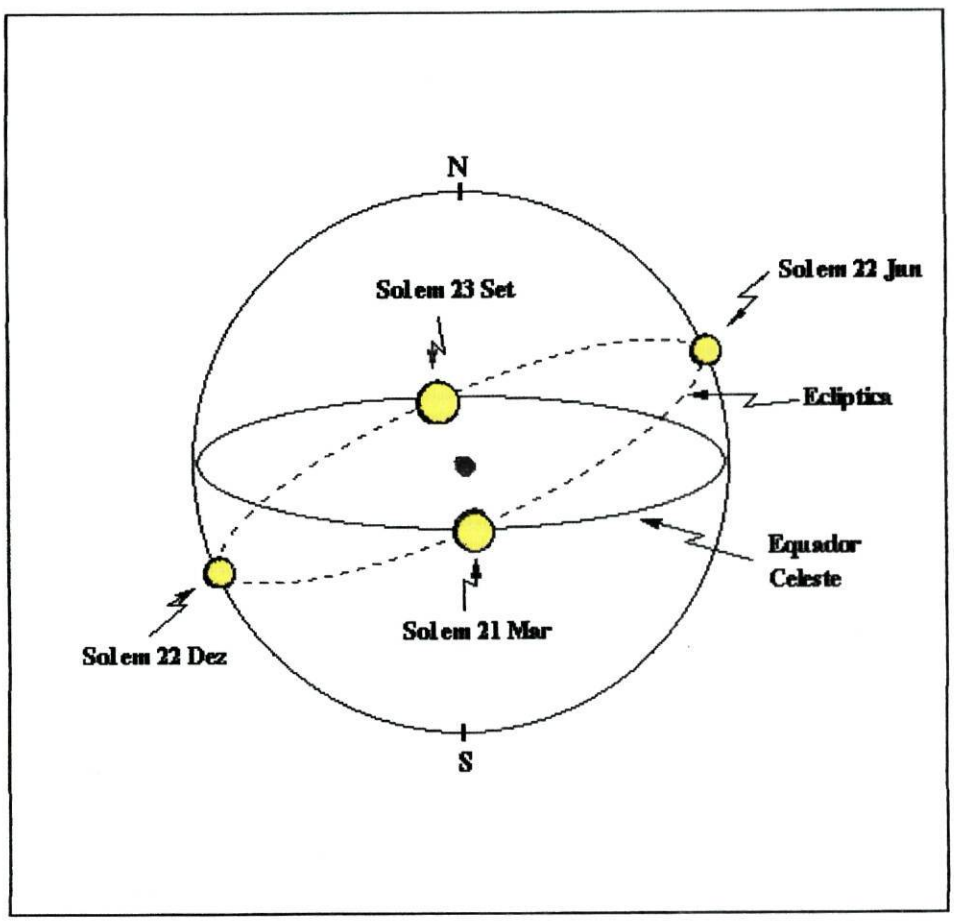


Figura 8.3 – As várias posições do Sol na eclíptica ao longo do ano

Retirada de http://pcastro7.if.ufrgs.br/index.htm

8.2 Sistema de Coordenadas Geográfico

Para determinar a posição de um astro no céu, precisamos definir um sistema de coordenadas. Nesse sistema, vamos utilizar apenas coordenadas angulares, sem nos preocuparmos com as distâncias dos astros. A posição do astro será determinada através de dois ângulos de posição, um medido sobre um plano fundamental e o outro medido perpendicularmente a ele. Antes de entrarmos nos sistemas de coordenadas astronómicas, convém recordar o sistema de coordenadas geográficas, usadas para medir uma posição sobre a superfície da Terra. Nesse sistema as coordenadas são *latitude* e a *longitude*.

- *longitude geográfica (λ):* é o ângulo medido ao longo do equador da Terra, tendo origem num meridiano de referência (o meridiano de Greenwich), e extremidade no meridiano do lugar. Na Conferência Internacional Meridiana, realizada em Washington em outubro de 1884, foi definida como variando de 0 a +180° (Oeste de Greenwich) e de 0 a -180° (Leste). Na convenção usada em astronomia, varia entre -12h (Oeste) e +12h (Leste).

$$-12h \leq \lambda \leq +12h$$

- *latitude geográfica (ϕ)*: ângulo medido ao longo do meridiano do lugar, com origem no equador e extremidade no lugar. Varia entre –90° e +90°. O sinal negativo indica latitudes do hemisfério sul e o sinal positivo do hemisfério norte.

$$-90° \leq \phi \leq +90°$$

Definição astronómica de latitude: A latitude de um lugar é igual à altura do pólo (h_P).

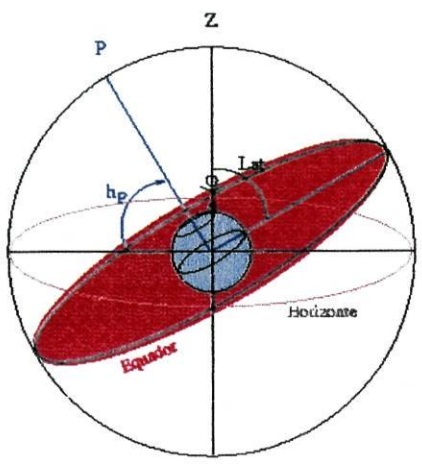


Figura 8.4 – Latitude astronómica
Retirada de http://pcastro7.if.ufrgs.br/index.htm

8.2.2 Coordenadas Astronómicas

8.2.2.1 O Sistema Horizontal

Como o próprio nome indica, este método de referenciar as posições dos astros toma como base o horizonte, linha fácil de considerar olhando a toda a volta do local em que nos encontramos.

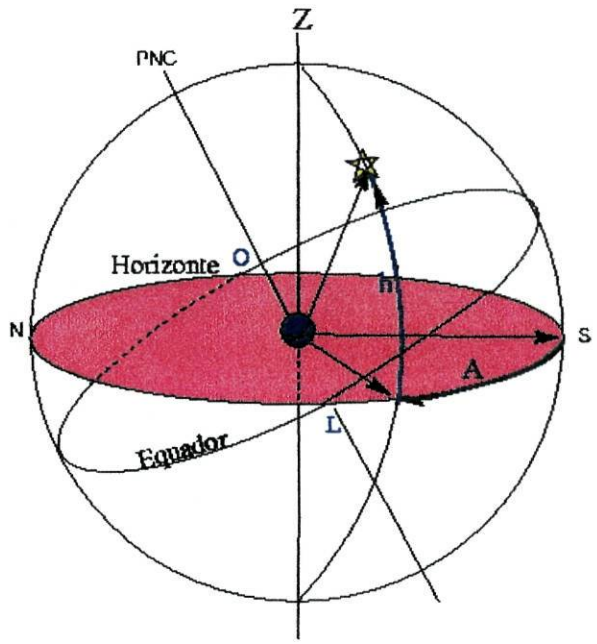


Figura 8.5 Sistema horizontal de coordenadas
Retirada de http://pcastro7.if.ufrgs.br/index.htm

Este sistema utiliza como plano fundamental o Horizonte celeste e como plano secundário o plano vertical que passa pela estrela. As coordenadas horizontais são *azimute* e *altura*.

Azimute (A): é o ângulo medido sobre o horizonte, desde o Sul até à intersecção do plano vertical que passa pela estrela com o horizonte. É medido no sentido horário (retrógrado). O azimute varia entre 0º e 360º.

$$0^\circ \leq A \leq 360^\circ$$

Altura (h): é o ângulo medido sobre o círculo vertical do astro, com origem no horizonte e extremidade no astro. A altura varia entre -90° e +90°. O complemento da altura chama-se *distância zenital (Z)*. Assim, a distância zenital é o ângulo medido sobre o círculo vertical do astro, com origem no zênite e extremidade no astro. A distância zenital varia entre 0° e 180°:

(h + z=90°)

$$-90^\circ \leq h \leq +90^\circ$$

$$0° \leq \mathbf{Z} \leq 180°$$

O sistema horizontal é um sistema *local*, no sentido de que é fixo na Terra. As coordenadas azimute e altura (ou azimute e distância zenital) dependem do lugar e do instante da observação, e não são características do astro.

À altura do PNC chama-se latitude do lugar ϕ=h(PNC)

No entanto este sistema não é o melhor porque as coordenadas dependem do observador.

8.2.2.2 O Sistema Equatorial Local

Este sistema usa como plano fundamental o equador e como plano secundário o circulo horário que passa pela estrela.

As coordenadas são:

- *ângulo horário (H)* – medido no Equador, desde a direcção Sul até à intersecção do circulo horário que passa pela estrela com o Equador. Medido no sentido retrógrado.

$$0^h \leq H \leq 24^h$$

- *declinação (δ)* – medido a partir do equador

$$-90° \leq \delta \leq 90°$$

Mas H varia com a rotação do céu nocturno, enquanto δ é constante.

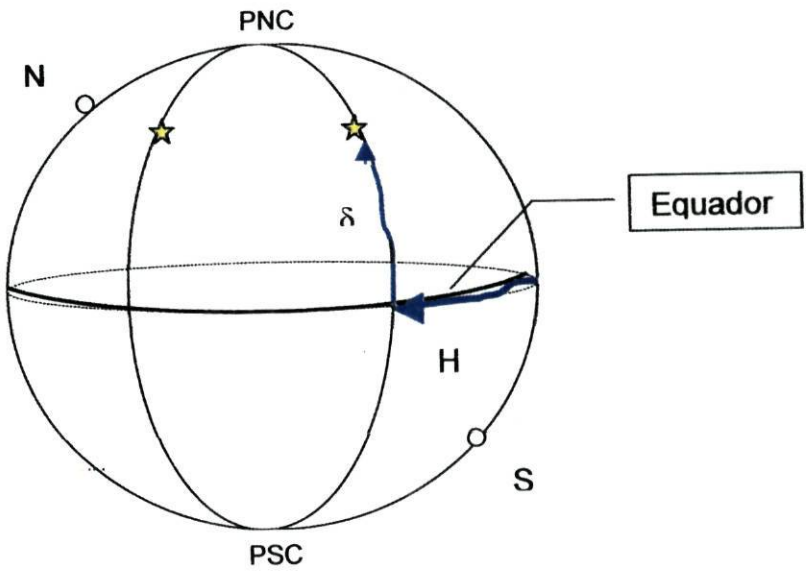


Figura 8.6 – Sistema equatorial local

8.2.2.3 O Sistema Equatorial Celeste

Este sistema utiliza como plano fundamental o Equador celeste. As suas coordenadas são a *ascensão recta* e a *declinação*.

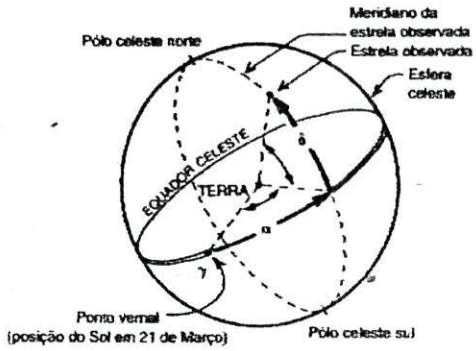


Figura 8.7 - Ilustração das coordenadas equatoriais: ascensão recta (α) e declinação (δ).
Retirado do livro "Introdução à Astronomia e às Observações Astronómicas" de Máximo Ferreira

ascensão recta (α ou *AR*): ângulo medido sobre o equador, com origem no meridiano que passa pelo ponto vernal, e extremidade no meridiano do astro. A ascensão recta varia entre 0h e 24h, medida no sentido directo.

$$0^h \leq \alpha \leq 24^h$$

Define-se *Ponto Vernal* (γ) ou equinócio da Primavera à intersecção entre o Equador e a eclíptica

declinação(δ): ângulo medido sobre o meridiano do astro, com origem no equador e extremidade no astro. A declinação varia entre –90° e +90°.

$$-90^\circ \leq \delta \leq +90^\circ$$

O sistema equatorial celeste é fixo na esfera celeste, e portanto suas coordenadas *não dependem* do lugar e instante de observação. A ascensão recta e a declinação de um astro permanecem praticamente constantes por longos períodos de tempo.

8.3 Tempo Sideral

O sistema equatorial celeste e o sistema equatorial local, juntos, definem o conceito de *tempo sideral*. O tempo sideral, assim como o tempo solar, é uma medida do tempo, e aumenta ao longo do dia.

Hora sideral (HS): ângulo horário do ponto Vernal (ponto de Áries). Pode ser medida a partir de qualquer estrela, pela relação:

$$HS = H_* + \alpha_*$$

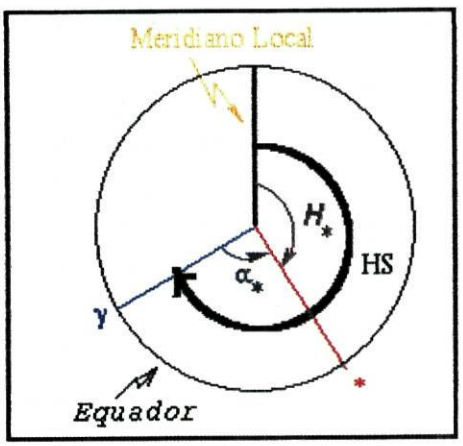


Figura 8.8 Tempo sideral
Retirada de http://pcastro7.if.ufrgs.br/index.htm

Dia Sideral: é o intervalo de tempo decorrido entre duas passagens sucessivas do ponto γ pelo meridiano do lugar.

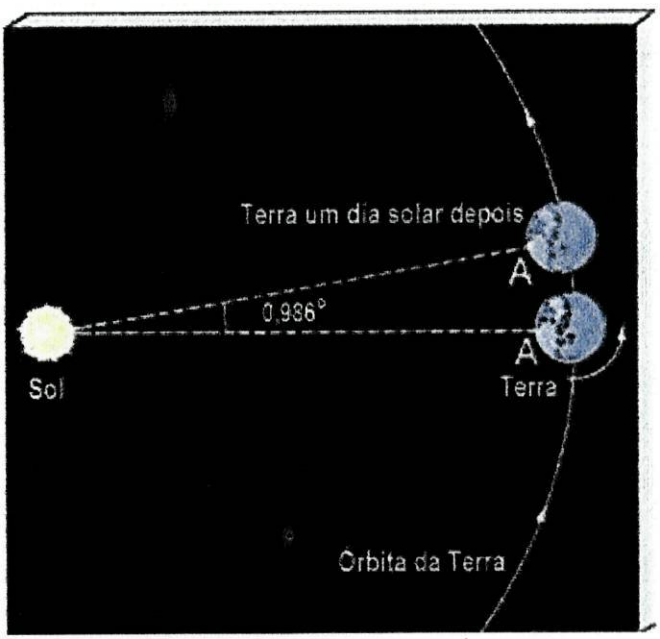


Figura 8.9 Dia solar
Retirada de http://pcastro7.if.ufrgs.br/index.htm

Dia Solar: é o intervalo de tempo decorrido entre duas passagens sucessivas do Sol pelo meridiano do lugar. É 3m56s mais longo do que o dia sideral. Essa diferença é devida ao movimento de translação da Terra em torno do Sol, de aproximadamente 1 grau (4 minutos) por dia (360°/ano). Como a órbita da Terra em torno do Sol é elíptica, a velocidade de translação da Terra em torno do Sol não é constante, causando uma variação diária de 1° 6' (4m27s) em Dezembro, e 53' (3m35s) em Junho.

8.4 Movimento Diurno dos Astros

O movimento diurno dos astros, de leste para oeste, é um reflexo do movimento de rotação da Terra, de Oeste para leste. Ao longo do dia, todos os astros descrevem no céu arcos paralelos ao Equador. A orientação desses arcos em relação ao horizonte depende da latitude do lugar.

Enquanto a esfera celeste perfaz uma volta, cada estrela descreve um arco completo em relação à Terra; esse arco é o arco diurno da estrela. Todos os arcos diurnos são paralelos ao equador celeste e demoram o mesmo tempo a ser descritos: um dia sideral. Uma estrela que esteja sobre o equador celeste descreve o maior arco diurno possível; quanto maior for a proximidade entre uma estrela e o pólo celeste menor será o arco diurno que ela descreve.

Chama-se *passagem meridiana* ao instante em que o astro cruza o meridiano local. Durante o seu movimento diurno, o astro realiza duas passagens meridianas, ou duas *culminações*: a culminação superior, ou passagem meridiana superior, ou ainda máxima altura (porque nesse instante a altura do astro atinge o maior valor), e a passagem meridiana inferior, ou culminação inferior. No instante da passagem meridiana superior, cumpre-se a seguinte relação entre z, δ, e ϕ:

$$z = \pm(\delta - \phi),$$

onde o sinal mais vale se a culminação é feita ao norte do zénite e o sinal menos se a culminação é feita ao sul do zénite. Se a estrela passar a norte do zénite a passagem é Superior Norte (PSN), se passar a sul do zénite, a passagem é Superior Sul (PSS). Todas as outras são passagens inferiores.

1. Nos pólos ($\phi=\pm 90$): Todas as estrelas do mesmo hemisfério do observador permanecem 24 h acima do horizonte (não têm nascer nem ocaso), e descrevem no céu círculos paralelos ao horizonte. As estrelas do hemisfério oposto nunca podem ser vistas.

2. No equador ($\phi= 0$): Todas as estrelas nascem e se põem, permanecendo 12h acima do horizonte e 12h abaixo dele. A trajectória das estrelas são arcos perpendiculares ao horizonte. Todas as estrelas do céu (dos dois hemisférios) podem ser vistas ao longo do ano.

3. Num lugar de latitude intermediária: Algumas estrelas têm nascer e ocaso, outras permanecem 24h acima do horizonte, outras permanecem 24h abaixo do horizonte. As estrelas visíveis descrevem no céu arcos com uma certa inclinação em relação ao horizonte, a qual depende da latitude do lugar.

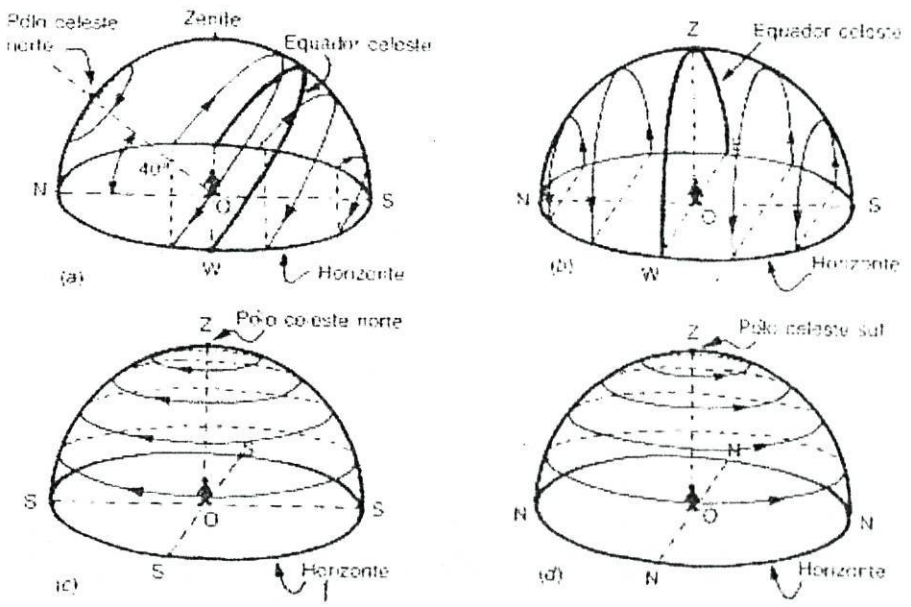


Figura 8.10 – Aspecto dos arcos diurnos descritos pelas estrelas, de acordo com a localização do observador: a) num local de latitude 40°N; b) no equador; c) no pólo Norte; d) no pólo Sul.
Retirada do livro "Introdução à Astronomia e às Observações Astronómicas" de Máximo Ferreira

Estrelas circumpolares são aquelas que não têm nascer nem ocaso, descrevendo o seu círculo diurno completo acima do horizonte. Portanto, as estrelas circumpolares fazem as duas passagens meridianas acima do horizonte. Para uma certa estrela com declinação δ ser circumpolar num lugar de latitudeϕ deve se cumprir a relação:

$$|\delta| \geq 90 - |\phi|$$

com δ e ϕ do mesmo sinal.

Para se derivar as relações entre os sistemas de coordenadas, é necessário utilizar-se a Trigonometria Esférica[11].

8.5 Posições características do Sol

Ao longo do ano, no seu movimento aparente, o Sol ocupa posições características e importantes, pelas suas características.

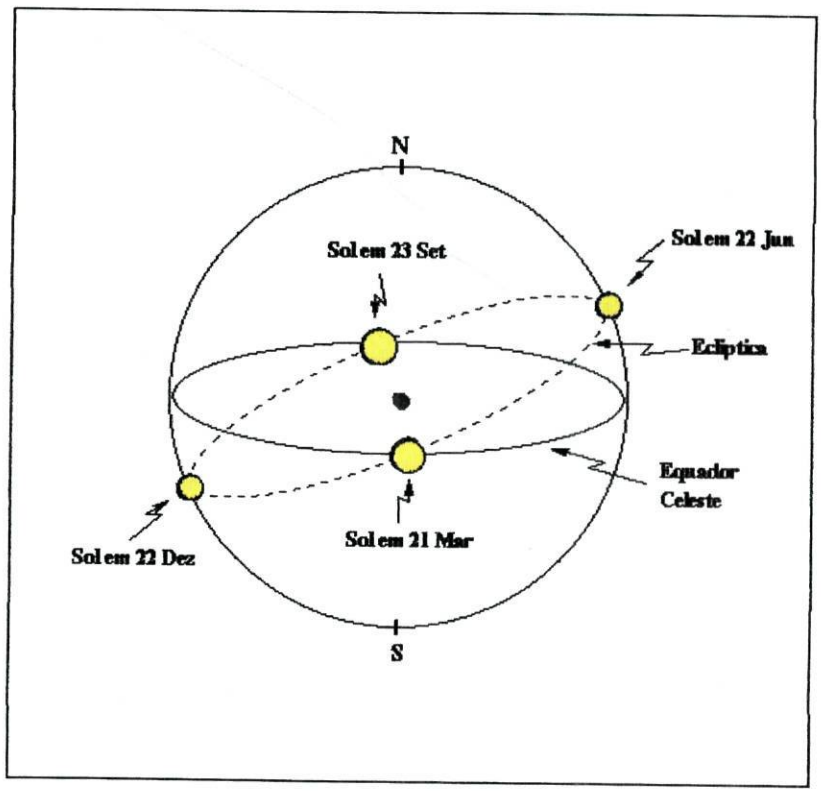


Figura 8.11 – Posições características do Sol ao longo do ano

Retirada de http://pcastro7.if.ufrgs.br/index.htm

≈21 Março: Sol cruza o equador, indo do Hemisfério Sul para o Hemisfério Norte:

$\alpha_{\odot} = 0^h$

$\delta_{\odot} = 0°$

[11] Para mais esclarecimentos sobre a trignometria esférica consultar http://pcastro7.if.ufrgs.br/index.htm

o dia e a noite duram 12 h em toda a Terra.

nos pólos, 24 h de crepúsculo.

Equinócio de Outono no HS.

Equinócio de Primavera no HN.

≈22 Junho: Sol está na máxima declinação norte, incidindo directamente na região do Trópico de Câncer na Terra:

$\alpha_{\odot} = 6^h$

$\delta_{\odot} = +23,5°$

o dia mais curto do ano no HS, dia mais longo do ano no HN.

no pólo S, Sol sempre abaixo do horizonte.

no pólo N, Sol sempre acima do horizonte.

Solstício de Inverno no HS.

Solstício de Verão no HN.

≈23 Setembro: Sol cruza o equador, indo do Hemisfério Norte para o Hemisfério Sul:

$\alpha_{\odot} = 12^h$

$\delta_{\odot} = 0°$

o dia e a noite duram 12 h em toda a Terra.

nos pólos, 24 h de crepúsculo.

Equinócio de Primavera no HS.

Equinócio de Outono no HN.

≈22 Dezembro: Sol está na máxima declinação sul incidindo directamente na região do Trópico de Capricórnio na Terra:

$\alpha_{\odot} = 18^h$

$\delta_{\odot} = -23,5°$

o dia mais longo do ano no HS, dia mais curto do ano no HN.

no pólo S, Sol sempre acima do horizonte.

no pólo N, Sol sempre abaixo do horizonte.

Solstício de Verão no HS.

Solstício de Inverno no HN.

Note que no dia 21 de Março, como o Sol está em $\alpha=0^h$, à meia-noite uma estrela com $\alpha=12^h$ passa pelo meridiano e as estrelas visíveis à meia noite em 21 de Março são as que têm $6^h < \alpha < 18^h$, além das circumpolares do local.

8.6 Variações das Coordenadas

Mesmo as coordenadas equatoriais celestes estão sujeitas a pequenas variações.

- ✓ Precessão: devido ao facto de a Terra não ser uma esfera e o Sol e a Lua se moverem numa órbita aparente inclinada relativamente ao Sol. O PNC executa um movimento de precessão em torno de PNE, descrevendo uma órbita circular de raio ε e período 26000 anos. É necessário pois conhecer a época a que as coordenadas (δ,α) se referem. Na época actual, o PNC está desviado da estrela Polar $\cong 1^\circ$. Daqui a 12000 anos o PNC apontará na direcção de Vega.(Ver capítulo 5)

- ✓ Nutação: Deve-se ao facto de o plano da órbita da Lua intersectar a eclíptica ao longo de uma recta que executa uma revolução em 18.6 anos.

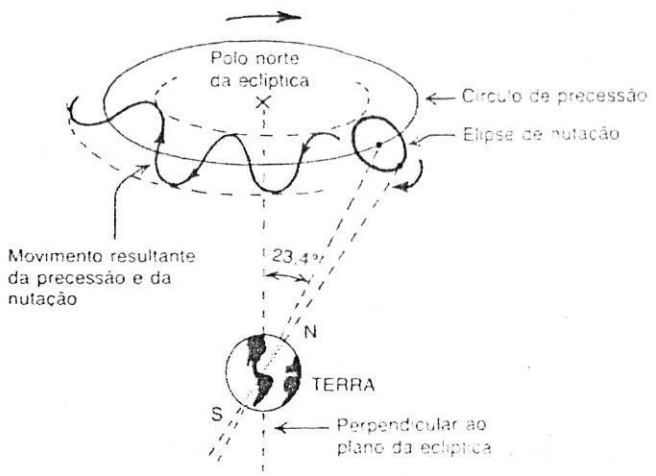
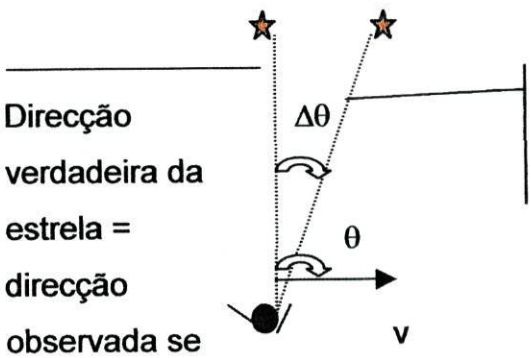


Figura 8.12 – Movimento de nutação da Terra. Nesta figura a amplitude do movimento de nutação foi exagerada, para maior visibilidade. De facto, os eixos da elipse de nutação medem apenas 18,4" e 13,7"; por isso, a amplitude do movimento de nutação do nosso planeta é cerca de 9000 vezes inferior à do movimento de precessão. Retirada do livro "Introdução à Astronomia e às Observações Astronómicas" de Máximo Ferreira

- ✓ Aberração: resultante da velocidade do observador (velocidade de rotação e velocidade de translação da Terra)



Temos que

$\Delta\theta = K\,sen\theta$

$k = \frac{v}{c} = 20''.496$ c= velocidade da luz;

v= velocidade de translação da Terra

θ = ângulo entre a direcção da estrela e a direcção instantânea do movimento da Terra.

Resultado: A posição da estrela é desviada de um ângulo Δθ na direcção do movimento da Terra

- ✓ Refracção atmosférica: a atmosfera terrestre provoca refracção da luz nas suas diferentes camadas, acima dos 100 km não há refracção apreciável. Daí que as melhores observações se façam acima da atmosfera e quando dentro é necessário calcular os diferentes efeitos pelas leis de reflexão e refracção.

8.7 Constelações

Constelações são agrupamentos *aparentes* de estrelas que os astrónomos da antiguidade imaginaram formar figuras de pessoas, animais ou objectos. Numa noite escura, podem-se ver entre 1000 e 1500 estrelas, sendo que cada estrela pertence a alguma constelação. As constelações ajudam a separar o céu em porções menores, mas identificá-las é em geral muito difícil. Os nomes actuais de muitas constelações são ainda vestígios dessas épocas. Algumas delas têm nomes de heróis e figuras lendárias (Hércules, Perseu, Cassiopeia, etc); outras receberam o nome de animais, tais como Leão, Touro, a Ursa Maior (ou Arado), etc.; outras ainda referem-se a objectos (seta, Lira, Balança, etc). Naturalmente que se o ordenamento do céu fosse estabelecido nos tempos modernos, é quase certo que se imaginariam algumas estrelas no céu a desenharem um telemóvel, um carro de corrida, uma nave espacial.

De acordo com a concepção actual, as constelações são apenas regiões da esfera celeste, relativamente às quais se mantiveram os nomes originais, apenas por tradição. De facto, revela-se ainda útil manter designações para as várias regiões da esfera celeste, pois isso permite referir, aproximadamente, as posições das estrelas, dos planetas e dos outros astros.
Na verdade, quando se diz que a estrela Sírio está na constelação do Cão Maior, ou que o planeta Júpiter (numa certa ocasião) está na constelação Touro, ficamos a saber, aproximadamente para onde olhar.

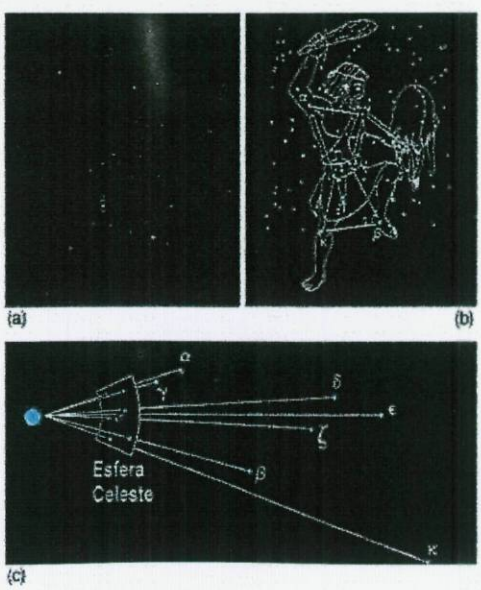


Figura 8.13 – A aparência das estrelas de uma constelação
Retirada de http://pcastro7.if.ufrgs.br/index.htm

As estrelas de uma constelação só estão aparentemente próximas na esfera celeste, pois na verdade estão a distâncias reais diferentes.

Quando se olha um atlas do céu, encontram-se representadas as constelações em diagramas como o seguinte, em que as estrelas são desenhadas com tamanhos diferentes para representar brilhos diferentes. Este diagrama mostra Órion na orientação em que é vista no hemisfério norte.

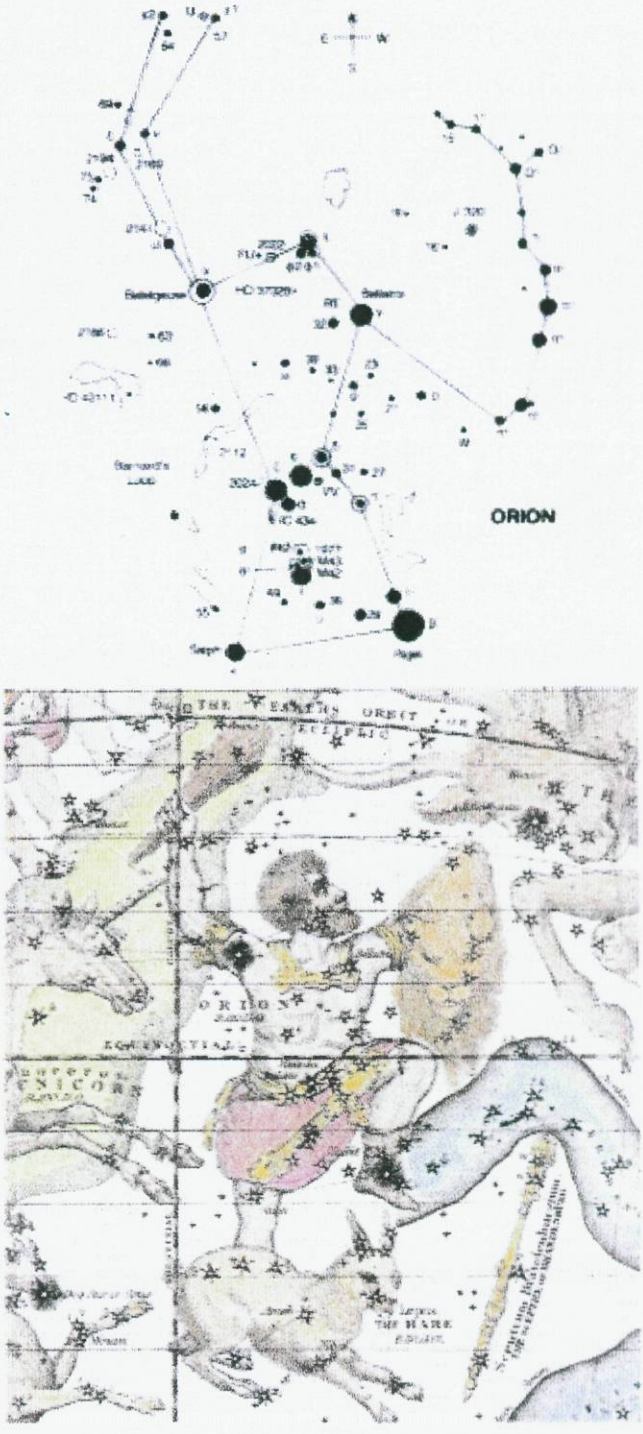


Figura 8.14 – Órion vista do hemisfério norte
Retirada de http://pcastro7.if.ufrgs.br/index.htm

As constelações surgiram na antiguidade para ajudar a identificar as estações do ano. Por exemplo, a constelação do Escorpião é típica do Inverno do hemisfério sul, já que em Junho ela é visível a noite toda. Já Órion é visível a noite toda em Dezembro e, portanto, típica do Verão do hemisfério sul. Alguns historiadores suspeitam que muitos dos mitos associados às constelações foram inventados para ajudar os agricultores a lembrarem-se quando deveriam plantar e colher.
As constelações mudam com o tempo, e em 1929 a União Astronómica Internacional adoptou 88 constelações oficiais, de modo que cada estrela do céu faz parte de uma constelação[12].

8.7.1 Coordenadas das Constelações

As constelações que formam o Zodíaco (círculo dos animais), uma faixa de 18 graus em volta da eclíptica, definida por Aristóteles, podem ser relacionadas pela mneumônica *ArTaGeCa LeViLiSco SaCAquaPi*, pois são: Aries, Taurus, Gemini, Cancer, Leo, Virgo, Libra, Scorpius, Sagittarius, Capricornus, Aquarius e Pisces.

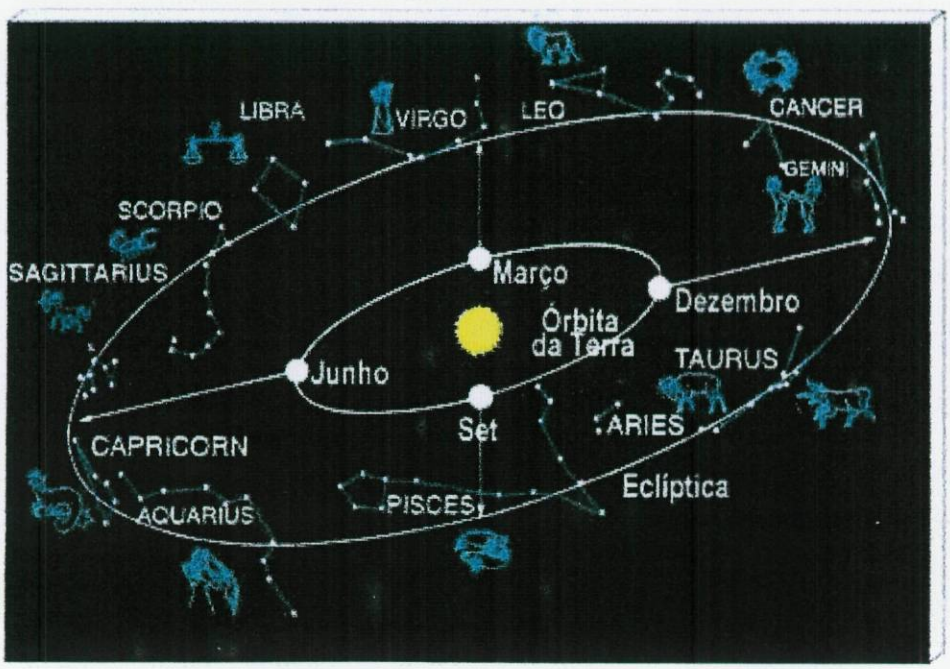


Figura 8.15 – As constelações na faixa da eclíptica
Retirada de http://pcastro7.if.ufrgs.br/index.htm

Devido à precessão dos equinócios, o Sol actualmente cruza
Áries de 18 de Abril a 12 de Maio,
Touro de 13 de Maio a 20 de Junho,

[12] Em anexo apresenta-se uma lista das constelações com o nome em Latim e em Português.

Gémeos de 21 de Junho a 19 de Julho,
Câncer de 20 de Julho a 9 de Agosto,
Leão de 10 de Agosto a 15 de Setembro,
Virgem de 16 de Setembro a 30 de Outubro,
Libra de 31 de Outubro a 22 de Novembro,
Escorpião de 23 de Novembro a 28 de Novembro,
Ofiúco de 29 de Novembro a 16 de Dezembro,
Sagitário de 17 de Dezembro a 18 de Janeiro,
Capricórnio de 19 de Janeiro a 15 de Fevereiro,
Aquário de 16 de Fevereiro a 11 de Março e
Peixes de 12 de Março a 17 de Abril.

O poeta grego Hesíodo (c.753-c.680 a.C.) escreveu em seu poema "Trabalhos e Dias" que quando a constelação do Órion estivesse no meio do céu e Arcturus estivesse no horizonte ao amanhecer, estava na hora da colheita.

8.7.2 Utilização dos mapas estelares e da carta celeste

Para o reconhecimento de qualquer região da esfera celeste, é aconselhável começar por identificar os pontos cardeais, a fim de se poder ter uma ideia previa do local do horizonte onde nascem os astros e onde vão desaparecer. Se é certo que, durante o dia, o único astro observável, capaz de permitir métodos de orientação, é o Sol, durante a noite é extraordinariamente fácil determinar os pontos cardeais à custa da Estrela Polar, no hemisfério Norte da Terra.

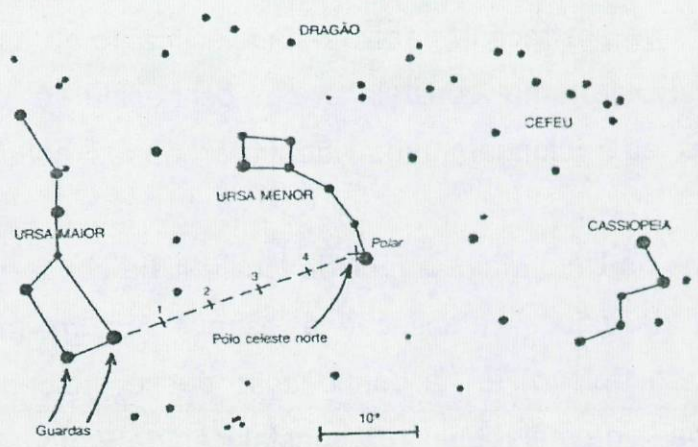


Figura 8.15 – A Estrela Polar encontra-se prolongando, cerca de 5 vezes, o alinhamento das guardas da Ursa Maior. A Estrela Polar está actualmente desviada 0,8° (aproximadamente) do Pólo Celeste Norte. Retirada do livro "Introdução à Astronomia e às observações astronómicas" de Máximo Ferreira.

Em locais de latitude sul, de onde a estrela Polar não é observável, a determinação do pólo celeste respectivo, e com ele a direcção do Sul, só é possível através do estabelecimento de alinhamentos de estrelas, nomeadamente do Cruzeiro Sul, visto que não há qualquer estrela de brilho assinalável nas proximidades do pólo Sul Celeste.

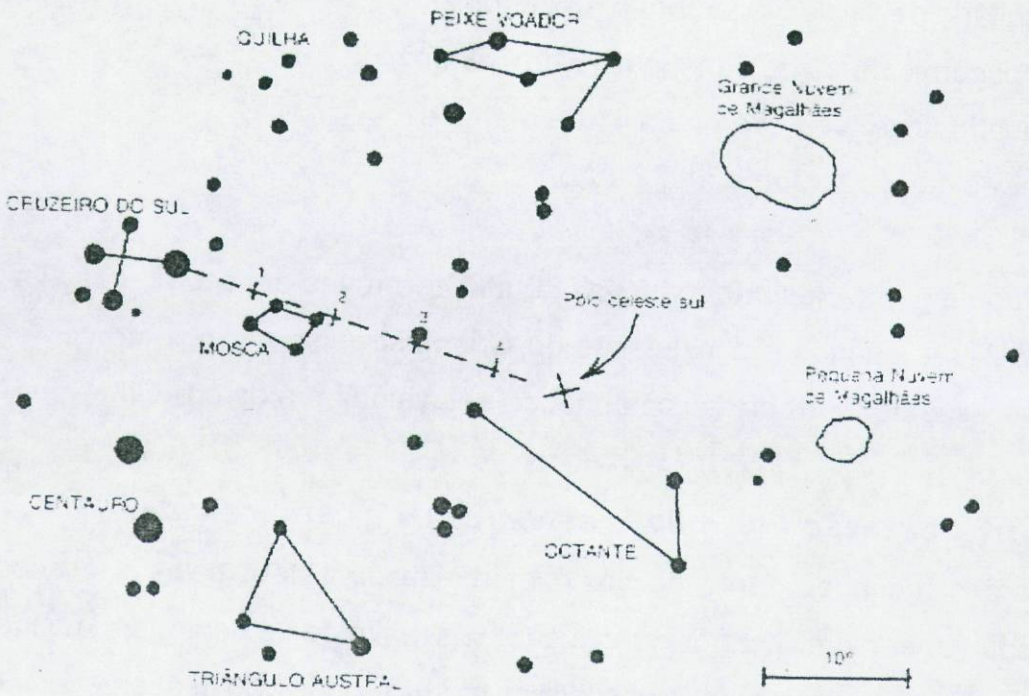


Figura 8.16 – O Pólo Celeste Sul encontra-se prolongando, cerca de 5 vezes, o alinhamento do braço maior do Cruzeiro Sul. Retirada do livro "Introdução à Astronomia e às observações astronómicas" de Máximo Ferreira.

Para além destas noções indispensáveis à orientação, é necessária imaginação e capacidade de abstracção para o estabelecimento de figuras geométricas De facto, partindo de uma constelação já conhecida, é possível, imaginando alinhamentos ou prolongamentos, identificar outras constelações ou estrelas individuais.

A constelação da Ursa Maior é fácil de localizar no céu e permite-nos, seguindo a curvatura da cauda, identificar a estrela Arcturo (a mais brilhante da constelação do Boieiro) e, na continuação desse prolongamento, encontrar a estrela Espiga (a de maior brilho da constelação da Virgem).

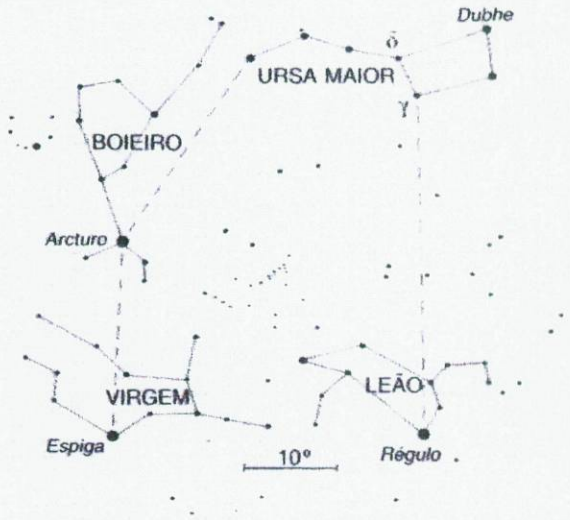


Figura 8.17 – A Ursa Maior, O Boieiro, a Virgem e o Leão. Localizam-se com facilidade as estrelas mais brilhantes destas constelações. Retirada do livro "Introdução à Astronomia e às observações astronómicas" de Máximo Ferreira.

O prolongamento da linha definida pelas estrelas δ e γ da Ursa Maior permite encontrar Régulo, a estrela mais brilhante da constelação Leão. A eclíptica passa praticamente por esta estrela.

É bastante evidente o chamado triângulo de verão (assim designado por ser facilmente observável durante aquela estação do ano). Este triângulo é desenhado no céu pelas estrelas brilhantes Deneb (da constelação do Cisne), Veja (da constelação da Lira) e Altair (da constelação da Aguia), como mostra a figura 8.18.

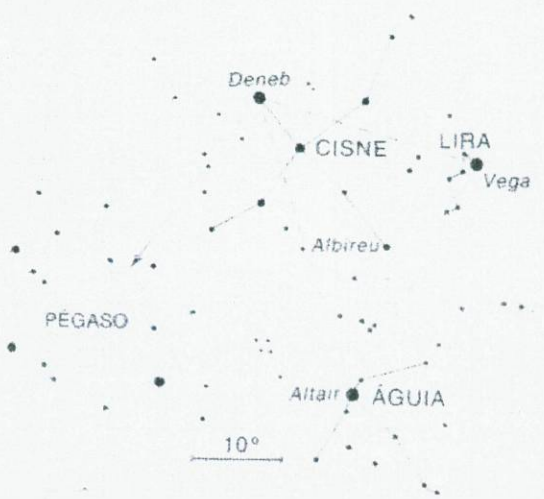


Figura 8.18 – As estrelas Deneb, Vega e Altair desenham no céu um triângulo isósceles: o triângulo de Verão. As constelações a que pertencem são fáceis de observar. Retirada do livro "Introdução à Astronomia e às observações astronómicas" de Máximo Ferreira.

Convém que se habitue a reconhecer as constelações em diferentes regiões celestes, apresentando diferentes inclinações conforme o momento de

observação. Não se deve, no entanto, identificar demasiadas constelações numa só noite. A aprendizagem das constelações deve ser feita à vista desarmada, pois só assim se terá uma visão do conjunto.

O conhecimento das estrelas de maior brilho também é útil, para obter uma lista dessas basta consultar por exemplo *Observar o Céu Profundo* de Máximo Ferreira e Guilherme de Almeida. Existem também muitas informações sobre as estrelas mais brilhantes visíveis em Portugal, assim como outras informações úteis. As cartas celestes apresentam assim a localização das diversas estrelas. Estes mapas parciais do céu são, fáceis de interpretar. Devido ao facto de o aspecto do céu se alterar progressivamente, em consequência do movimento aparente do Sol, fazem-se representa-se das estrelas observáveis em diferentes épocas, e a uma mesma hora.

Por exemplo as imagens abaixo representam as variações das posições das constelações entre o Outono e a Primavera.

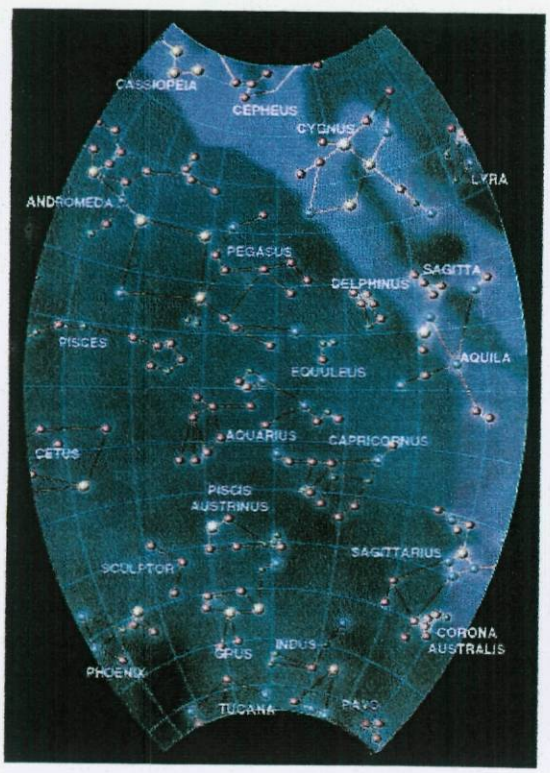


Figura 8.19 – Carta Celeste representando as constelações no Outono
Retirada de http://www.windows.ucar.edu/

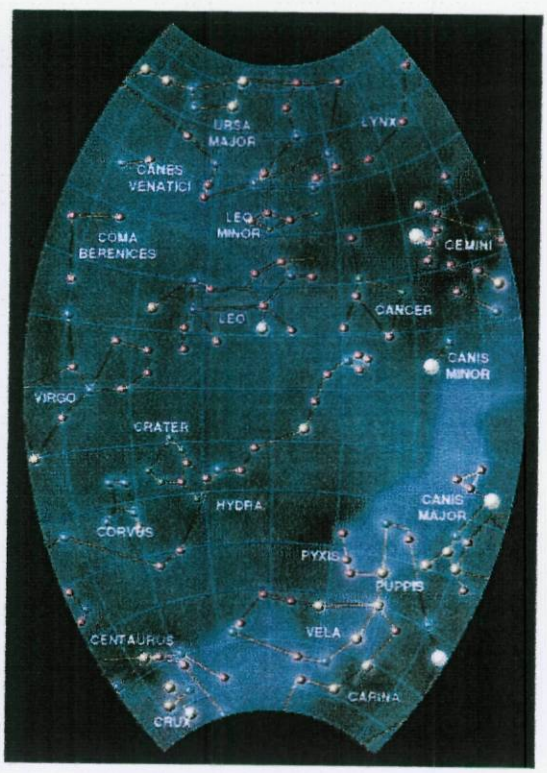


Figura 8.20 – Carta Celeste representando as constelações na Primavera
Retirada de http://www.windows.ucar.edu/

Conhecer pois as posições relativas das estrelas e das diferentes constelações é muito útil para o estudo do céu. As variações das posições das estrelas, podem pois servir como um processo de orientação durante a noite.

8.8 Orientação e observação do céu

Como processos de orientação pode-se recorrer a:

- ✓ Bússola
- ✓ Movimento aparente dos astros: Sol durante o dia e estrelas durante a noite.

A utilização da bússola relaciona-se com as propriedades dos imanes e com o facto de a Terra criar em seu redor um campo de interacções magnéticas. (Para mais detalhe ver capítulo 6).

Colocando a bússola na horizontal, o local indicado pela parte da agulha assinalada fica a norte, o sul fica na extremidade oposta da agulha. Virando-nos então para Norte, o Oeste fica à nossa esquerda e o este à nossa direita.

O movimento aparente do Sol permite-nos, conhecendo as suas posições, ao longo do dia, identificar a altura do dia, bem como recorrendo à variação da sombra dos objectos.

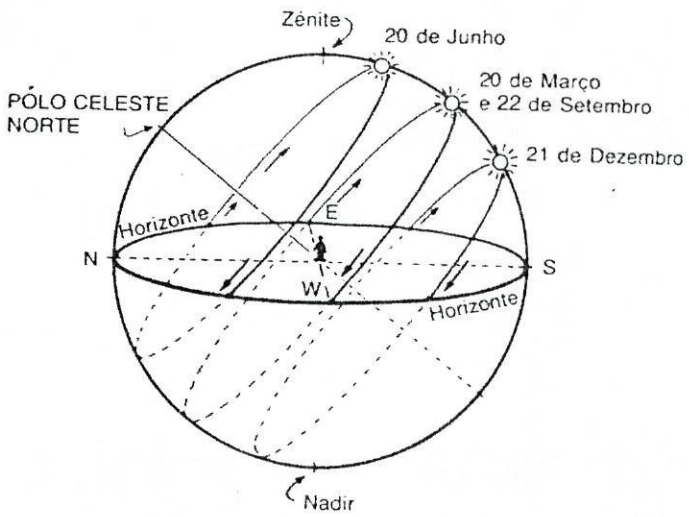


Figura 8.21 – Variação das posições aparentes do Sol. Retirada do livro "Introdução à Astronomia e às observações astronómicas" de Máximo Ferreira.

Recorrendo ao uso das cartas celestes e à identificação de estrelas características, estas servem de processo de orientação, como salientado anteriormente.

Capítulo 9 - Estrutura estelar

9.0 Introdução

Neste capítulo apresentam-se algumas propriedades básicas das estrelas: como é uma estrela por dentro, que processos ocorrem no seu interior e a evolução estelar desde a formação das estrelas até aos seus estágios finais de existência.

9.1 Propriedades de Estrelas

As estrelas que vemos no céu nocturno estão centenas de milhares de vezes mais distantes de nós do que os astros do sistema solar (planetas e o Sol). A estrela mais próxima (depois do Sol) está tão longe que a nave espacial mais rápida já desenvolvida levaria quase 100 mil anos para chegar até ela. Ainda assim, por curiosidade e ambição, queremos saber como as estrelas se formam, por que estágios passam e como deixam de existir. Como podemos aprender sobre objectos tão remotos e fora do nosso alcance? Para compreende-las melhor podemos estudar algumas das suas propriedades observáveis como:

- a posição
- a luminosidade
- a distância
- o raio
- a massa
- a composição química
- a distribuição de energia

9.1.1 A posição

A posição que observamos de uma estrela é uma posição local e deve ser corrigida de três fenómenos: refracção astronómica, paralaxe geocêntrica e aberração diurna[13]. Para corrigir a paralaxe geocêntrica, considera-se que existe no centro da Terra um ponto comum a todos os observadores. Para corrigir a aberração diurna, tem de se ter em consideração a velocidade de

[13] Para maiores desenvolvimentos sugere-se a consulta de "Introdution to stellar astrophysics-vol 1" Erika Böhm-vitense

rotação local. Após feitas estas correcções, obtém-se a posição aparente da estrela (que é geocêntrica). Esta necessita de correcção de paralaxe e aberração anuais, após o que se obtém a posição verdadeira (em relação ao centro do Sol). No entanto, esta ainda necessita de sofrer algumas correcções devido à precessão e à nutação, obtendo-se então a sua posição média. A posição média é relativa a uma determinada época. Quando pretendemos saber as coordenadas de uma estrela procura-se num catálogo de uma determinada época ou de uma época próxima [$(\alpha,\delta)_{2000}$].

9.1.2 A luminosidade aparente[14]

A quantidade de energia luminosa que uma estrela emite por unidade de tempo é chamada de *luminosidade* (geralmente representada pela letra **L**). As estrelas tornam-se mais ténues se as suas distâncias aumentam, porque a sua luminosidade, L, espalha-se sobre uma superfície cada vez maior.

O *fluxo* é a quantidade de energia que chega a uma área unitária de um detector (por exemplo, os nossos olhos, um filme fotográfico, um CCD) num tempo unitário. O "brilho" de uma estrela ou *fluxo observado*, pode diferir do fluxo emitido. Assim, quando se fazem cálculos em relação ao fluxo observado deve-se ter em conta a sensibilidade do detector e a extinção atmosférica. Estando à superfície da Terra, por exemplo, para se obter o brilho acima da atmosfera têm de se de fazer correcções relacionadas com a passagem da luz pela mesma.

A energia de qualquer fonte de luz é irradiada radialmente em todas as direcções. Assim, esferas concêntricas (centradas na fonte de luz) recebem a mesma quantidade de luz em cada instante.

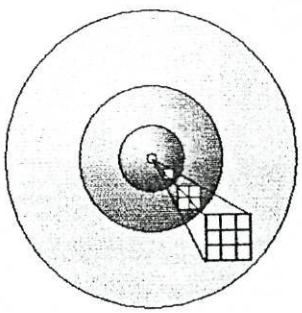


Figura 9.1 – Distribuição da luz à medida que se afasta da fonte

[14] Para maiores desenvolvimentos sugere-se a consulta de "Introdution to stellar astrophysics-vol 1" Erika Böhm-vitense

A mesma quantidade de energia tem de passar por cada superfície esférica, independentemente do seu raio. Como a área de uma superfície esférica de raio r é $4\pi r^2$, o fluxo F de energia por essa superfície será dado por $F = L / 4\pi r^2$. Isso porque L é a energia que atravessa toda a esfera por unidade de tempo, sendo F a energia por unidade de tempo e por unidade de área. Esta é a lei do inverso do quadrado: *Aumentando a distância o fluxo decresce com o quadrado do mesma.*

A luminosidade de uma estrela, a totalidade da energia emitida por unidade de tempo pode ser expressa como $L_* = 4\pi r_*^2 f^*$ erg s^{-1}.

O valor mínimo da luminosidade de uma estrela tem a ver com a dimensão mínima para poder ser uma estrela. Se a estrela produzir demasiada energia no interior terá de a trazer para o exterior, pois a estrela é uma estrutura dinâmica em constante equilíbrio.

$$L_* \in \left]10^{-4}, 10^{6}\right[L_\Theta \qquad L_\Theta = 3{,}85 x 10^{33} \text{ erg.s}^{-1}.$$

9.1.2.1 Sistema de magnitude

O brilho das estrelas pode ser expresso por um sistema de magnitude. O astrónomo grego Hipparcos definiu este sistema por volta de 150 A.C. Ele atribuiu às estrelas mais brilhantes do céu uma magnitude m=1, às um pouco menos brilhantes do que as primeiras uma magnitude m=2, e assim por diante, até que todas as estrelas visíveis por ele tivessem valores de magnitude entre 1 e 6, sendo este último valor atribuído às estrelas menos brilhantes do céu. Portanto, o sistema de magnitude é baseado no brilho das estrelas visíveis a olho nu.

No século XIX os astrónomos desenvolveram os meios tecnológicos para medir objectivamente o fluxo de uma estrela. Ao invés de abandonar o antigo sistema de magnitude, os astrónomos resolveram refiná-lo e torná-lo mais quantitativo. Observou-se então que uma *diferença de 5 em magnitude correspondia a um factor de exactamente 100 vezes em fluxo.* Os outros intervalos de magnitude foram estabelecidos com base na ideia da época de que o olho humano respondia a diferenças de brilho numa escala logarítmica, de forma que a magnitude da estrela não é directamente proporcional ao fluxo recebido, mas ao seu logaritmo. Hoje sabemos que o olho não é exactamente um detector logarítmico.

Os nossos olhos captam razões iguais de fluxo como intervalos iguais de brilho. Na escala de magnitude, um intervalo de 1 em magnitude corresponde a um factor de $100^{1/5}$, ou aproximadamente 2.512, em fluxo. Por exemplo, estrelas de magnitude m=1 são da ordem de 2.512 vezes mais brilhantes do que estrelas de magnitude m=2. Comparadas com as de m=3, o factor em fluxo é de $2.512 \times 2.512 = 2.512^2$ vezes. Continuando, as estrelas de magnitude m=1 são $2.512 \times 2.512 \times 2.512 = 2.512^3$ vezes mais brilhantes do que as de magnitude m=4, e assim por diante. O factor 2.512 em cada caso é elevado a um expoente igual à diferença em magnitude.

Alguns objectos vão além dos limites originais do sistema de magnitude concebido por Hipparcos, cujos valores estavam no intervalo de 1 a 6. Alguns objectos muito brilhantes podem ter magnitude m=0, ou mesmo negativa, enquanto objectos invisíveis a olho nu têm magnitude m>6. É importante lembrar sempre que os objectos mais brilhantes (de maior fluxo) têm magnitude menor do que os objectos mais ténues.

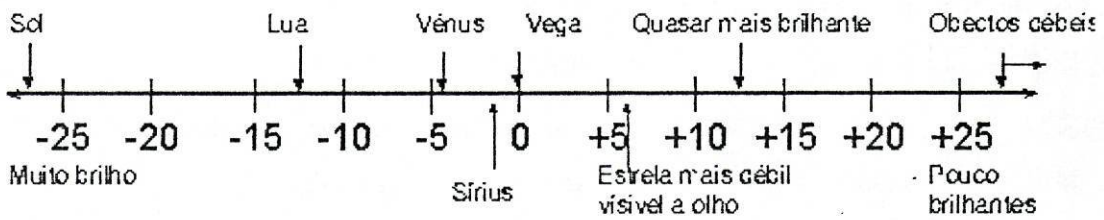


Figura 9.2 – Brilho aparente de alguns objectos no sistema de magnitude

9.1.2.2 Magnitude Aparente

A magnitude referida é também chamada de *magnitude aparente (m)* e está relacionada com o fluxo do objecto.

$$m = -2.5 \log b + c_1,$$

$$b = \int_0^\infty f_\lambda^0 s_\lambda d\lambda,$$

sendo f_λ^0 o fluxo observado acima da atmosfera e s_λ a função de sensibilidade do sistema.

Alguns exemplos de magnitude aparente:

$m_{Sol} = -26.7$, $m_{Lua} = -12.6$, $m_{Vénus} = -4.4$, $m_{Sírius} = -1.4$, $m_{Vega} = 0.00$.

As estrelas mais fracas que o olho pode detectar tem m=+6.5, o quasar mais brilhante, m= +12.8 e os objectos mais ténues já observados, m = 30.

Como se compara a diferença em magnitude?

A estrela A tem uma magnitude aparente m_A = 5.4 e a estrela B tem uma magnitude aparente m_B = 2.4. Qual a estrela mais brilhante e com que factor?

A estrela B é *mais brilhante* do que a estrela A porque a sua magnitude aparente é numericamente menor.

A estrela B é mais brilhante em 5.4 - 2.4 = 3 magnitudes.

Em termos de fluxo, a estrela B tem um fluxo $2.512^{(5.4-2.4)} = 2.512^{3.0} = 15.8$ vezes maior do que a estrela A. Ou seja, a quantidade de energia por unidade de tempo e por unidade de área que recebemos de B é quase 16 vezes maior do que a que recebemos de A.

A magnitude de uma estrela varia na razão inversa do brilho: quanto maior for a magnitude menor será o brilho e quanto menor for a magnitude maior será o brilho.

9.1.2.3 Magnitude Absoluta e Luminosidade

Se uma estrela está a uma distância de 10 parsecs, a sua magnitude aparente m é igual à sua *magnitude absoluta M*. Esta última é uma medida da luminosidade da estrela, definida como a quantidade total de energia irradiada por uma fonte por unidade de tempo. Se se medir a magnitude aparente de uma estrela e se conhecer a sua magnitude absoluta, pode-se determinar a sua distância. Na verdade, a relação entre magnitude aparente, magnitude absoluta e distância nada mais é do que a lei da variação do brilho pelo quadrado da distância expressa em escala logarítmica. Esta relação pode ser expressa matematicamente pela fórmula:

$$m = M + 5 \log r(pc) - 5,$$

onde m e M são as magnitudes aparente e absoluta da estrela, respectivamente, e r(pc) a sua distância a nós em parsecs.

Se se medir a magnitude aparente (fluxo) de uma estrela e conhecer a sua distância, podemos determinar a sua magnitude absoluta (luminosidade). Esta última é uma propriedade da estrela em questão, não dependendo da sua distância. Por esta razão, a magnitude absoluta está associada às propriedades

físicas do interior da estrela, sendo uma grandeza mais importante do que a magnitude aparente.

Conhecidas as magnitude absolutas de duas estrelas, compara-se as suas luminosidades, porque a magnitude absoluta é proporcional ao logaritmo da luminosidade: $M_1 - M_2 = -2.5 \log (\frac{L_1}{L_2})$.

Logo, $\frac{L_1}{L_2} = 10^{-0.4(M_1 - M_2)}$ ou $\frac{L_1}{L_2} = 2.512^{(M_2 - M_1)}$.

A estrela de maior luminosidade tem uma magnitude absoluta menor do que a de menor luminosidade, ou seja, se $L_1 > L_2$, $M_1 < M_2$.

9.1.3 A distância

A distância a que se encontra uma estrela é uma propriedade que pode ser determinada por vários métodos:

- método da paralaxe trigonométrica
- método da paralaxe espectroscópica
- método do ponto de convergência
- método do ajuste das sequências principais no diagrama de côr
- método da relação período – luminosidade

O método da paralaxe trigonométrica, é um dos métodos usados como referido no capítulo 7, para determinar a distância a que se encontra uma estrela.

$$d(pc) = \frac{1}{\pi''}$$

O método da paralaxe espectroscópica utiliza a equação

$$(m - M) = 5 \log d - 5$$

Este método é mais preciso que a paralaxe trigonométrica para distâncias superiores a 20 pc e aplicável até $d \leq 10^4$ pc.

Para enxames de estrelas pode-se usar o método do ponto de convergência, se as estrelas no enxame estão tão próximas umas das outras que se possa dizer que há uma distância média ao enxame. Este método é aplicável aos enxames mais próximos, com d<100 pc.

$$\langle d \rangle = \frac{\langle v_r tg\phi \rangle}{4.74 \langle \mu \rangle}$$

onde μ é o movimento próprio, que é muito pequeno; v_r é a velocidade radial da estrela.

Também para os enxames se pode usar o método do ajuste das sequências principais no diagrama de cor. Este método pode ser usado para $d<10^4$pc.

A relação período- luminosidade também pode ser usado para estrelas muito brilhantes (por exemplo as Cefeides, $-2 \leq m \leq -6$). As Cefeides são estrelas varáveis periódicas, com períodos de 1 a 50 dias, sendo o mais frequente de cerca de 5 dias. O tipo espectral das Cefeides também varia com o mesmo período, de $G_0 - K_5$ no mínimo até $F_4 - G_0$, no máximo.

Como exemplo δ_{Cep} com um mínimo G_6 e um máximo F_4. As Cefeides são estrelas mais brilhantes que as estrelas com idêntica classe espectral situadas na sequência principal. Há cerca de 500 conhecidas na nossa Galáxia. Para as estrelas Cefeides há uma relação entre a magnitude absoluta e o período. Devido a esta relação é possível determinar a luminosidade destas estrelas e consequentemente as suas distâncias. Este método é aplicável até $d \leq 10^6$pc.

Magnitudes e Distâncias de algumas estrelas conhecidas

(a partir de medidas precisas de distância com a missão Hipparcos)

Estrela	Mag app. m	Dist. (pc)	Mag. Abs. M	Luminosidade(rel. ao Sol)
Sol	-26.74	4.848×10^{-6}	4.83	1
Sirius	-1.44	2.637	1.45	22.5
Arcturus	-0.05	11.25	-0.31	114
Vega	0.03	7.756	0.58	50.1
Spica	0.98	80.39	-3.55	2250
Estrela de Barnard	9.54	1.821	13.24	1/2310
Proxima Centauri	11.01	1.295	15.45	1/17700

Como determinar distâncias e luminosidade a partir das suas magnitudes aparente e absoluta?

Definiu-se como módulo da distância a que um objecto se encontra á diferença entre as suas magnitudes aparente e a absoluta, ou seja, m - M. Se se medir, por exemplo, a magnitude aparente m e se determinar a distância a partir do método da paralaxe, pode-se inferir imediatamente a magnitude absoluta M.

Por exemplo, o caso de Sirius: m = -1.44; as medidas do Hipparcos conferem-lhe uma distância de 2.6371 pc. Logo, a sua magnitude absoluta é

$$M = -1.44 - 5\times log(2.6371) + 5 = -1.44 - (5\times 0.421127) + 5 = 1.45.$$

Invertendo a situação, se se conhecer a magnitude absoluta de uma estrela, medida a sua magnitude aparente determina-se a sua distância.

$$r(pc) = 10^{\frac{(m-M+5)}{5}}$$

Por exemplo, Spica tem uma magnitude aparente de 0.98. Estrelas do seu tipo têm magnitudes absolutas M = -3.55; assim sendo, a distância de Spica pode ser estimada como sendo,

$$r = 10^{[0.98 - (-3.55) + 5]/5} = 10^{1.906} = 80.54 \text{ pc.}$$

Este valor está de acordo com a distância obtida pelo satélite Hipparcos usando medidas de paralaxe.

9.1.4 O Raio

A medição directa do raio apenas é possível para o Sol, cujo diâmetro angular é ≈30'. Como d=1UA então:

$$D = d\frac{30' x 60''}{206265}, \text{ logo } r_{\odot} = 6.96x10^{10} cm$$

D= diâmetro

Para outras estrelas a medição directa é impossível devido ao efeito do "seeing" – a radiação de uma estrela ao atravessar a atmosfera terrestre percorre elementos de massa de ar com temperatura e turbulência diferentes, logo com diferentes valores para o índice de refracção. Daí resulta que há variações (pequenas) na direcção da radiação e consequentemente a imagem formada no foco do telescópio não é pontual. Na realidade é uma mancha, de dimensão variável, entre 0.5" em locais excelentes para a observação, e 4-5" em locais de má qualidade astronómica. Existem técnicas interferométricas que utilizando a expressão

$$\alpha = 1.22\frac{\lambda}{D},$$

que impõe um limite ao valor do raio angular, α, que pode ser medido directamente, para estrelas gigantes vermelhas. Há ainda outras técnicas interferométricas (por exemplo medindo a variação temporal da intensidade que resulta das flutuações produzidas por interferência, quando a luz da estrela é recebida em dois espelhos) que também têm permitido a medição directa do diâmetro angular de estrelas muito brilhantes.

Quando as estrelas estão muito próximas da eclíptica, pode-se recorrer à ocultação lunar. Uma vez que o plano de órbita da Lua está inclinado ≈5° em relação à eclíptica, é preciso que a ocultação lunar ocorra para serem visíveis. De facto o que é medido não é o intervalo de tempo entre o início e o fim do eclipse da estrela pela Lua. O que se faz é uma medição do fluxo de energia da estrela nesse curto intervalo de tempo e a comparação da curva de interferência produzida pela difracção da luz da estrela pelo limbo da Lua (que depende de α) com curvas simuladas para vários diâmetros angulares. A partir desta comparação identifica-se o valor a que corresponde o melhor ajuste.

Quando o raio de uma estrela varia, em geral a sua luminosidade também varia. Uma estrela grande tem luminosidade maior do que uma pequena se as suas temperaturas efectivas são iguais. Dessa forma, podemos determinar o tamanho de uma estrela, conhecida a sua luminosidade e temperatura efectiva. O tamanho é outra característica importante de uma estrela.

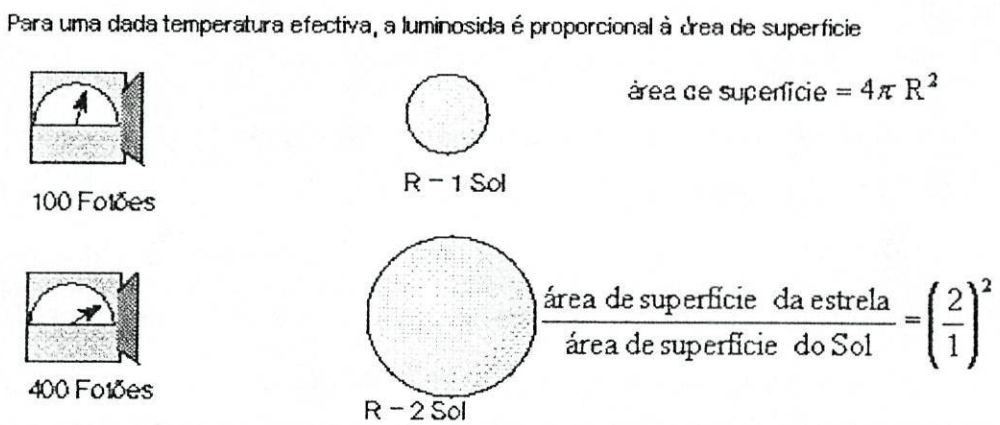


Figura 9.3 Relação entre a área de superfície e a luminosidade
Adaptado de http://www.iagusp.usp.br/~jane/aga215/index.html

9.1.5 A massa

Para determinar a massa de uma estrela pode-se utilizar sistemas binários (um binário é um sistema de duas estrelas dinamicamente ligadas), ou recorrer à relação massa-luminosidade.

Quando se utilizam sistemas binários aplicam-se os conhecimentos obtidos por Kepler e expressos nas suas leis. O movimento das estrelas é estudado em relação ao centro de massa do binário. Cada estrela executará um movimento em relação ao centro de massa do binário. O período do binário é dado pela expressão:

$$(M_1 + M_2) = \frac{4\pi^2 a^3}{GP^2}.$$

Num binário ocorre uma variação periódica da curva da luz, e para o seu estudo integra-se o brilho do sistema em torno do centro de massa. Ocorre também uma variação periódica da velocidade radial, que é estudada por espectroscopia, sendo a velocidade da estrela secundária projectada na nossa direcção. Estudam-se depois as formas das curvas obtidas e as suas áreas. Só se determinam as massas isoladamente quando se consegue resolver completamente as duas condições em relação ao centro de massa (conhecer as duas órbitas em relação ao centro de massa). Pela lei de Kepler obtém-se a soma das massas, e a razão entre a soma das massas pela lei $\frac{d_1}{d_2} = \frac{M_2}{M_1}$.

Este método implica que as estrelas estejam próximas, para se medir directamente as distâncias e as massas. Só há 100 binários que conseguimos medir desta forma.

Para os casos da massa bem determinada directamente, foi-se ver se havia razão nas luminosidades e fez-se o gráfico. Para as estrelas da classe O, muito brilhantes foi possível determinar a sua massa. Para pares de estrelas O e B é possível estabelecer uma relação entre a massa e a luminosidade $L_* \alpha M_*^{3.8}$. Partindo desta relação obtém-se uma forma indirecta de determinar a massa. Conhecendo a luminosidade e tendo a relação calcula-se a massa. Este método é válido para toda a gama de massas com que se trabalha normalmente.

9.1.6 A composição química

O estudo da composição química de uma estrela é feito por espectroscopia. Estuda-se assim os elementos presentes na estrela, bem como a sua percentagem. No espectro de uma estrela podemos:

- identificar o contínuo, que corresponde à temperatura efectiva da estrela.
- Identificar as riscas espectrais de absorção (emissão), que estão relacionadas com os elementos químicos.
- Medir a quantidade de energia absorvida (emitida), na risca, E_λ.

A maior parte do material das estrelas é hidrogénio. Designa-se por:

X a % em massa que é H

Y a % em massa do He

Z a % em massa dos restantes elementos

X+Y+Z=1

Ao fazer a análise da composição química das estrelas chega-se à conclusão que há dois grupos distintos a que se chamam Populações estelares:

- A População I, em que as abundâncias características são

$X \approx 0.7\text{-}0.8$

$Y \approx 0.28\text{-}0.2$

$Z \approx 0.02$

Exemplo o Sol.

- A População II, que se caracteriza por $Z \approx < 0.01$.

Verifica-se também que estas duas populações de estrelas diferem no que respeita:

- Idade – as estrelas da população I são jovens, enquanto as estrelas da população II são das mais antigas da Galáxia.
- Localização – as estrelas da população I distribuem-se no plano galáctico ou próximo dele e em particular nos braços espirais, as estrelas da população II têm uma distribuição aproximadamente esférica em torno do centro galáctico.
- Dinâmica – grandeza e orientação da velocidade espacial.

9.1.7 A distribuição de energia

A luminosidade L de uma estrela pode ser expressa em função do seu tamanho e da sua temperatura superficial: $L = 4\pi R^2 sT^4$,onde R é o *raio* da estrela (aproximando-a a uma esfera), T a *temperatura* nas suas camadas externas e s é uma constante chamada de *constante de Stefan-Boltzmann*. A fórmula acima pode ser entendida se admitirmos que o fluxo na superfície da estrela é dado por $F_S = sT^4$, sendo portanto fortemente dependente da temperatura. A luminosidade será então dada necessariamente pela área externa da estrela multiplicada pela energia que flui por unidade de área e de tempo por esta área, F_S. O facto de depender fortemente da temperatura significa que mesmo pequenos aumentos na temperatura superficial da estrela (também chamada de *temperatura efectiva)* levam a um grande aumento na sua luminosidade.

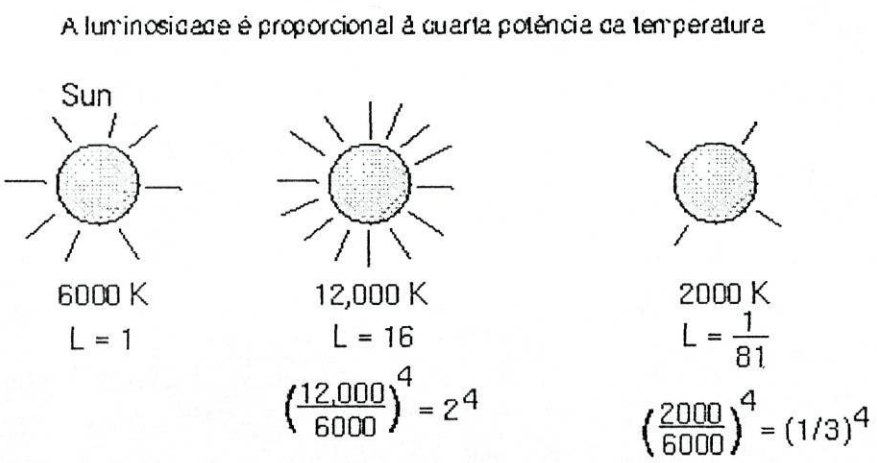


Figura 9.4 Relação entre a luminosidade e temperatura, normalizada para o valor solar.

A maioria das estrelas próximas a nós são de baixa luminosidade. Presumindo que a vizinhança do sistema solar é uma região típica da Galáxia, podemos deduzir que o número de estrelas de baixa luminosidade é muito maior do que o de estrelas de grande luminosidade. As estrelas brilhantes que vemos mesmo nas grandes cidades são as excepções da Via-Láctea! As estrelas de mais baixa luminosidade têm magnitudes absolutas M=+19, enquanto que as de maior luminosidade têm M=-8. Trata-se de um enorme domínio em luminosidade

9.1.7.1 Cor e Temperatura

As estrelas são esferas de gás densas e quentes. Emitem luz pela conversão da sua energia térmica (ou energia interna) em radiação electromagnética. O seu

espectro de radiação é semelhante ao de um irradiador térmico perfeito ou *corpo negro*. Este produz um espectro contínuo, emitindo luz em todos os comprimentos de onda (λ); o comprimento de onda λ em que há um máximo de emissão depende da temperatura da estrela: quanto maior a sua temperatura, menor o comprimento de onda em que se dá o máximo de emissão. Assim sendo, a cor das estrelas depende da sua temperatura - estrelas quentes são azuladas e estrelas frias são avermelhadas. No caso de estrelas, "frio" significa temperaturas da ordem de 2000 ou 3000K. Estrelas azuis têm temperaturas de 20000K ou mais. O Sol é uma estrela amarela, de temperatura intermediária, próxima a 6000K.Como quantificar a cor de uma estrela? Podemos observar as estrelas usando filtros que só permitem a passagem de luz restrita num intervalo pequeno de comprimentos de onda. Ao analisar o espectro em dois ou mais diferentes domínios do comprimento de onda, pode-se então determinar se o espectro é de uma estrela quente, morna ou fria.

9.1.7.1.1 Índice de Cor

A cor de uma estrela pode ser quantificada pela medida do *índice de cor*. O "índice de cor B-V" permite quantificar a cor de uma estrela usando medidas de magnitude em dois filtros: o filtro B, que só permite a passagem de luz no domínio azul do espectro e o filtro V, que transmite apenas a luz no domínio de comprimento de onda consistente com o verde - amarelo. A diferença de magnitudes B-V, quantifica, portanto, a importância relativa desses dois domínios do espectro para o fluxo total da estrela.

Uma estrela quente tem B-V próximo de zero enquanto que uma estrela fria possui ~B-V=2.0. Outras estrelas têm valores intermediários (o Sol, por exemplo, tem B-V=0.6).

Mais genericamente, os índices de cor são definidos em função das magnitudes observadas em diferentes comprimentos de onda, ou mais especificamente, nas diferentes bandas espectrais. O sistema fotométrico mais usual, definido por Johnson, considera as bandas U(l =350nm), B(l =450nm) e V(l =550nm), onde U, B, V representam a magnitude aparente (m_U, m_B, m_V) nas bandas espectrais do ultravioleta, do azul e do visível, respectivamente. Os sistemas fotométricos também se estendem para outras faixas espectrais, como o vermelho (R,I) e infravermelho (J,H,K,...).

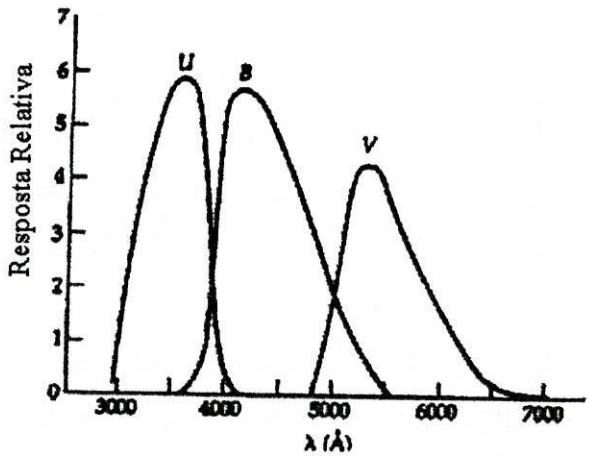


Figura 9.4 Perfil padrão dos filtros UBV, indicando o máximo de resposta nos diferentes comprimentos de onda.

Retirada de http://www.iagusp.usp.br/~jane/aga215/index.html

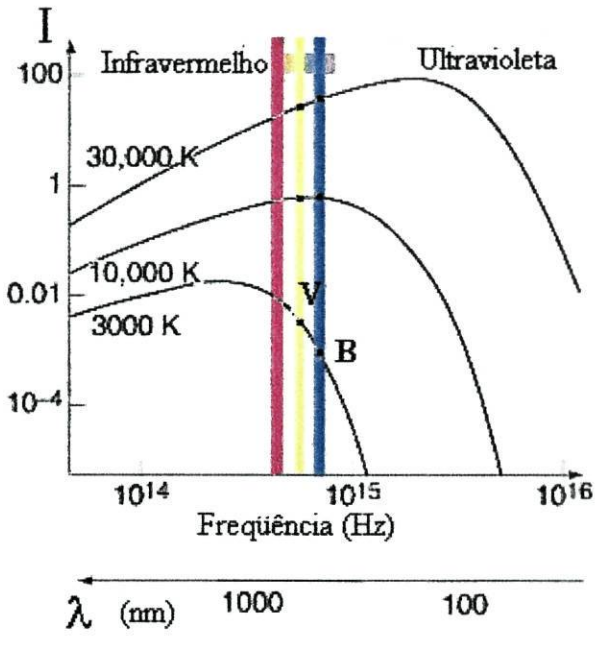
O índice de cor [B-V] de uma estrela é dado por

$$m_B - m_V = 2{,}5 \log\left(\frac{F_V}{F_B}\right),$$

Da mesma forma, $[U-B]=m_U-m_B$, $[J-K]=m_J-m_K$, etc.

Considere-se três estrelas (a), (b) e (c), cujas temperaturas são $T_{(a)} > T_{(b)} > T_{(c)}$. Se a estrela (a) é muito quente, exemplo T~30000K, então o seu fluxo na banda B é maior que na banda V. No caso da estrela (b) com T~10000K, as intensidades em B e V são aproximadamente iguais. Para (c), uma estrela vermelha com T~3000 K, a intensidade em V é bem maior que em B. Salienta-se que a magnitude varia em sentido contrário ao valor do fluxo.

Como o comprimento de onda para o qual a emissão de um corpo negro é máxima depende da temperatura do mesmo, os índices de cor também vão depender da temperatura da estrela. Desta forma, pode-se dizer que quanto mais [B-V] for negativo (B<<V) mais quente será a estrela e portanto mais azulada. Por outro lado, quanto mais positivo for [B-V] (B>>V), mais fria será a estrela e portanto mais avermelhada.



< P>

Figura 9.5 Curvas de corpo negro para três temperaturas, indicando-se a posição dos filtros B (azul) e V (visível). Retirada de http://www.iagusp.usp.br/~jane/aga215/index.html

Os passos necessários para se determinar o índice de cor B-V são:

- Medir o fluxo da estrela usando cada um dos dois filtros (B e V).
- Converter os fluxos medidos em magnitudes aparentes B e V.
- Tomar a diferença entre as magnitudes aparentes obtidas, B-V.

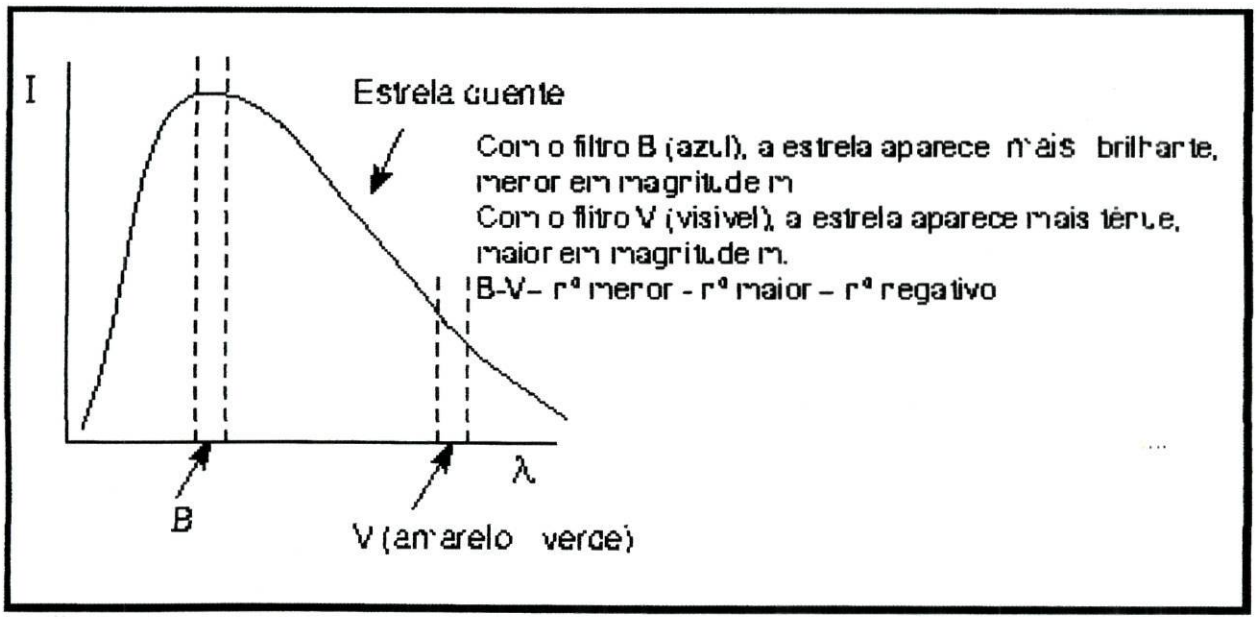


Figura 9.6 Fluxo de uma estrela quente. Retirada de http://www.iagusp.usp.br/~jane/aga215/index.html

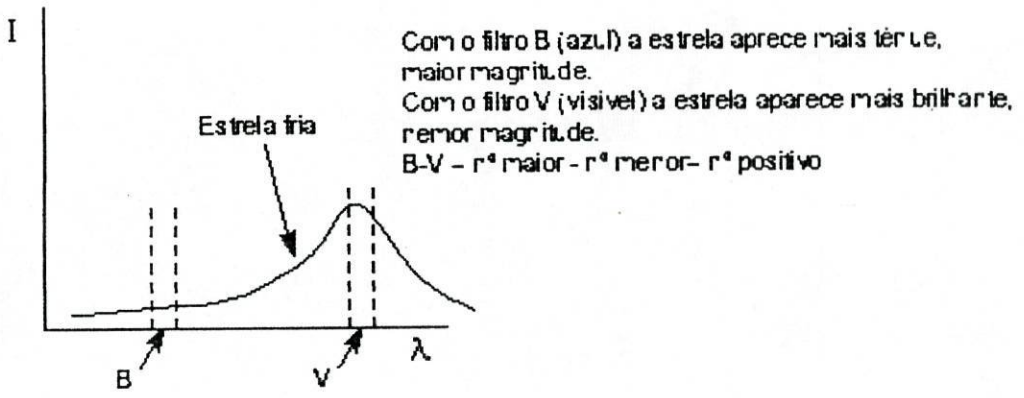


Figura 9.7 – Fluxo de uma estrela fria

Retirada de http://www.iagusp.usp.br/~jane/aga215/index.html

9.1.7.2 Lei de Wien e Temperatura

Outra maneira de se determinar a temperatura de uma estrela é obtendo o seu espectro e aplicando a Lei de Wien, que relaciona a temperatura ao comprimento de onda em que se dá o máximo de emissão de luz pela estrela:

$T \lambda_m = 0.29$ cm Kelvin

Estrelas frias têm este máximo para comprimentos de onda relativamente longos (em direcção ao vermelho), enquanto que as mais quentes têm um máximo de contínuo espectral em comprimentos de onda mais curtos (azul). Se pudéssemos aumentar a temperatura da estrela, o pico do espectro deslocar-se-ia para o azul. Uma outra maneira de se determinar a temperatura, mais preciso do que os demais, faz uso não do contínuo do espectro, mas das linhas de absorção.

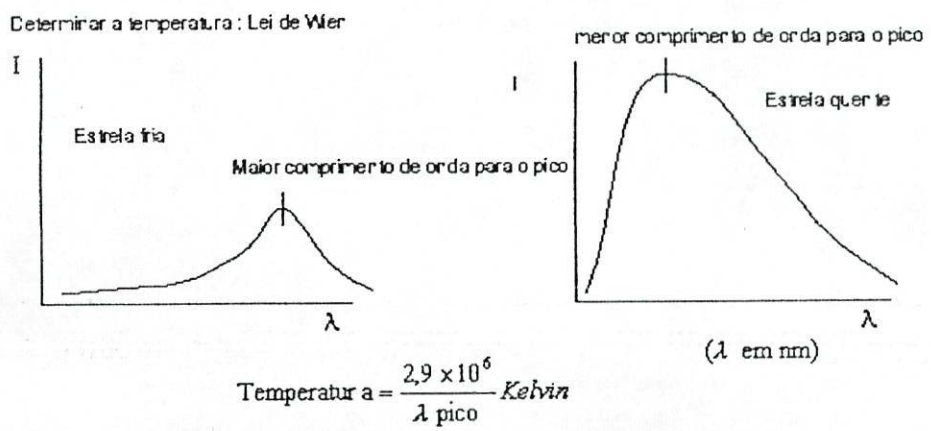


Figura 9.8– Relação da lei de Wien e a temperatura

Retirada de http://www.iagusp.usp.br/~jane/aga215/index.html

9.1.7.3 Tipos espectrais de Estrelas:

O espectro de uma estrela é a decomposição da sua luz nos seus diferentes comprimentos de onda (λ) ou frequências (ν). Os espectros estelares diferem uns dos outros, permitindo-nos classificá-los de acordo com as suas características mais importantes. As *classes* ou *tipos espectrais* são baseados nas linhas de absorção que encontramos em cada espectro. Algumas estrelas têm fortes linhas espectrais associadas ao elemento hidrogénio (classes A e F). Outras possuem linhas de hidrogénio fracas, mas fortes linhas de cálcio e magnésio (tipos G e K). Após anos a catalogar as estrelas, foi possível definir 7 classes básicas: O, B, A, F, G, K e M. As classes espectrais correlacionam-se fortemente com a temperatura; estrelas do tipo O são quentes enquanto as de tipo M são frias. As classes foram posteriormente subdivididas em 10 subclasses, numeradas de 0 a 9. Por exemplo: nosso Sol é uma estrela do tipo G2. Sirius é uma estrela mais quente e branco-azulada, do tipo B3.

Porque é que algumas estrelas têm linhas de hidrogénio intensas enquanto outras têm linhas de cálcio? A resposta está não na sua composição (todas as estrelas contêm cerca de 70% da sua massa na forma de hidrogénio), mas sim na sua temperatura. À medida que aumenta a temperatura, os electrões de um átomo adquirem mais energia, tornando-se menos ligados aos seus núcleos atómicos. A energia adquirida pelos electrões advém da interacção dos seus átomos com a luz (o que resulta nas linhas de absorção), ou de colisões entre átomos.

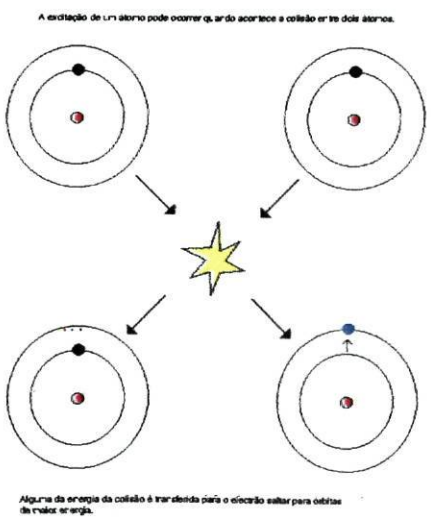


Figura 9.9– Excitação de um átomo por colisão
Retirada de http://www.iagusp.usp.br/~jane/aga215/index.html

Se a colisão é suficientemente forte, um electrão pode ser arrancado do átomo, no processo de *ionização*. Um átomo também pode ser ionizado se absorver um fotão. Na verdade, este é o mecanismo mais eficiente de ionização no interior das estrelas. Ao perder todos ou muitos de seus electrões, um átomo deixa de interagir com a luz e, portanto, de produzir linhas em absorção. A temperatura para a qual os átomos de um elemento se ionizam depende do elemento, o que faz com que para cada temperatura se vejam somente linhas produzidas por determinados elementos, conferindo assim uma assinatura espectral típica daquela temperatura.

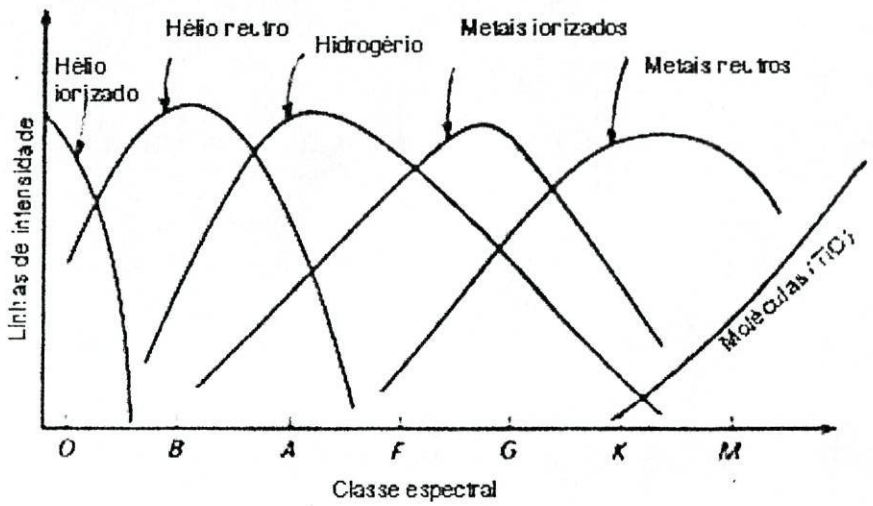


Figura 9.10- Elementos mais abundantes nas diferentes classes espectrais
Retirada de http://www.iagusp.usp.br/~jane/aga215/index.html

As estrelas mais quentes são, em geral, também mais massivas. Por conseguinte, a classe espectral está correlacionada não apenas com a temperatura, mas também com a massa das estrelas, com o seu raio e luminosidade. Para as estrelas médias (chamadas também de estrelas da sequência principal) a tabela seguinte resume as suas propriedades:

Tipo	Massa	Temp.	Raio	Lum. (Sol = 1)
O	60.0	50 000	15.0	1 400 000
B	18.0	28 000	7.0	20 000
A	3.2	10 000	2.5	80
F	1.7	7 400	1.3	6
G	1.1	6 000	1.1	1.2
K	0.8	4 900	0.9	0.4
M	0.3	3 000	0.4	0.04

O nosso Sol é portanto uma estrela ordinária, de tipo espectral G2. Uma estrela de classe espectral B é muito maior, mais luminosa e mais quente.

Existem estrelas com um grande domínio de tamanhos e cores. Aldebaran, por exemplo, é uma supergigante vermelha; Arcturus é uma gigante alaranjada.

Outros extremos em tamanho são também encontrados entre as estrelas; há estrelas que são muito pequenas, de tamanho comparável ao da Terra ou de um planeta gigante, como Júpiter. São as anãs brancas e as anãs castanhas: Existem também supergigantes azuis, como Rigel, assim como gigantes ou subgigantes amareladas como Capella ou Procyon.

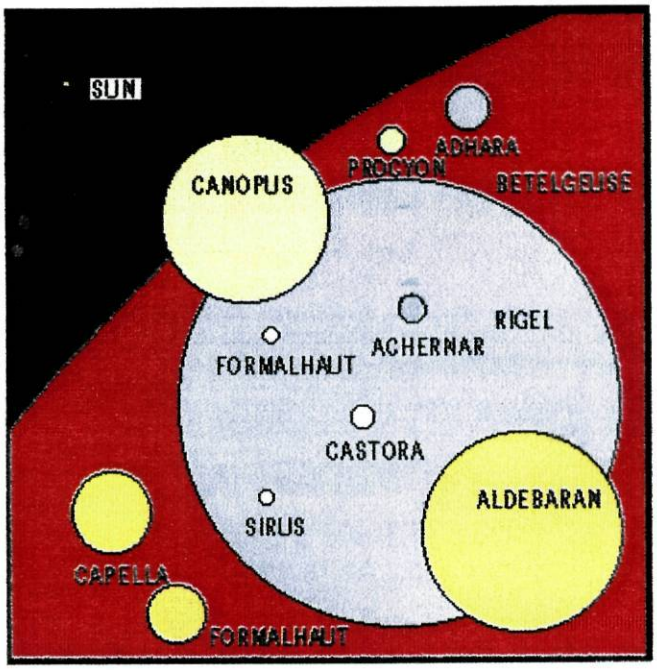


Figura 9.11– Alguns exemplos de diferentes tamanhos de estrelas
Retirada de http://www.iagusp.usp.br/~jane/aga215/index.html

9.1.7.4 Função de Luminosidade:

Estudos de estrelas baseados no seu fluxo levam-nos claramente a seleccionar mais estrelas luminosas, pois estas são visíveis a distâncias maiores. Serão as estrelas brilhantes que se vêem no céu típicas? Para se responder a esta pergunta, é preciso determinar a *função da luminosidade estelar*, que dá o número de estrelas da Galáxia em função da sua luminosidade (ou magnitude absoluta).

Uma função de luminosidade é construída contando todas as estrelas contidas num determinado volume, supostamente representativo da Galáxia como um todo. O resultado é tipicamente algo mostrado na figura que segue:

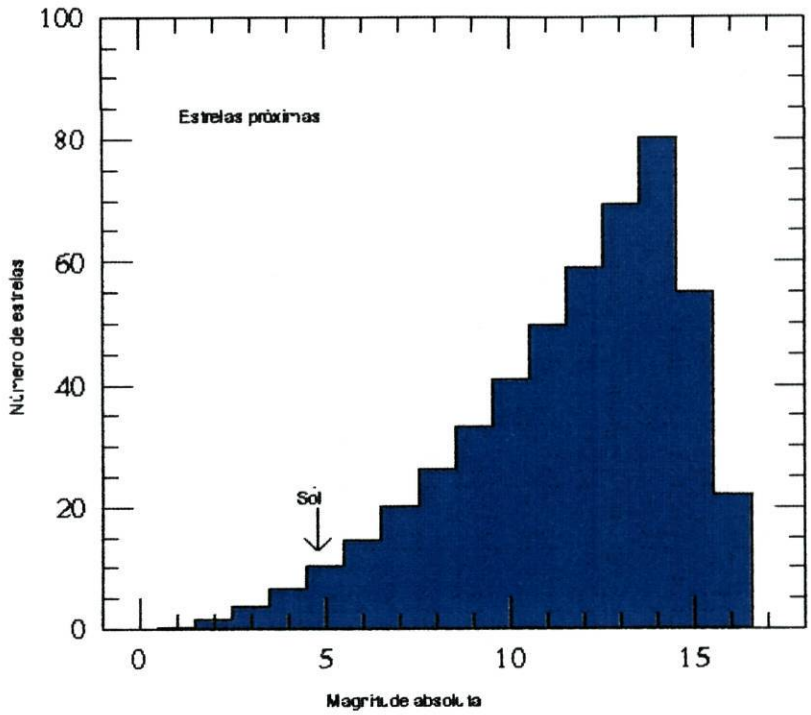


Figura 9.12– Função luminosidade para estrelas próximas
Retirada de http://www.iagusp.usp.br/~jane/aga215/index.html

Nota-se então que as estrelas mais comuns que existem são as de baixa luminosidade e pequeno tamanho. As estrelas luminosas são raras. Como massa e a luminosidade se correlacionam, pode-se também dizer que estrelas massivas são raras.

Apesar do grande domínio de luminosidades, temperaturas, tamanhos e classes espectrais de estrelas, há um parâmetro físico que é o mais importante: a massa. Estrelas quentes, luminosas e grandes (classes espectrais O e B) são em geral de grande massa. Estrelas frias são maioritariamente pequenas, de baixa luminosidade e massa. Esta dependência das propriedades de uma estrela com sua massa é basicamente o que enuncia o *Teorema Russell-Vogt*.

9.2 Estrutura Estelar:

As estrelas formam-se a partir de nuvens de gás que colapsam devido à sua gravidade interna. O colapso é interrompido pela pressão interna no centro da estrela. Durante o colapso, a energia potencial gravitacional armazenada no gás é convertida em energia interna, aquecendo a região central da nuvem. O aumento da temperatura acarreta o aumento da pressão interna, contrabalançando a gravidade.

A energia interna da estrela produzida durante o colapso é suficiente para mantê-la a irradiar luz por cerca de 15 milhões de anos (intervalo conhecido como tempo de Kelvin-Helmholtz). A maioria das estrelas têm idades ~ 10 bilhões de anos ou mais, de forma que precisam de mais energia, produzindo-a de outra forma diferente da contracção gravitacional. A origem desta energia são as reacções nucleares de fusão, que libertam a energia armazenada nos núcleos atómicos e a convertem em calor e luz.

A estrutura de uma estrela é determinada por cinco conceitos e relações básicos:

- ✓ equilíbrio hidrostático- A maioria das estrelas, como o Sol, não se expande nem se contrai. Mantêm o seu tamanho estável. Isso implica que o gradiente de pressão em cada ponto no interior da estrela compensa a força gravitacional causada pelo peso do material acima do mesmo ponto. A estrela é um objecto auto-gravitante.

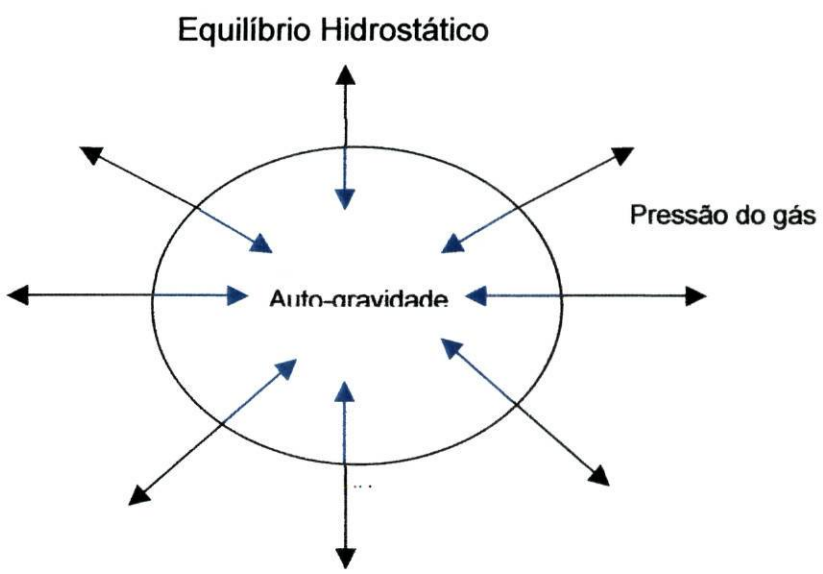


Figura 10.13 – O Sol não se está a expandir ou a contrair, está em equilíbrio. A força da gravidade é contrabalançada pela força da pressão. Adaptada de http://www.iagusp.usp.br/~jane/aga215/index.html

✓ equilíbrio térmico- a energia produzida no núcleo central da estrela a partir de reacções termonucleares por unidade de tempo, é igual à energia que a estrela perde na forma de radiação electromagnética por unidade de tempo.

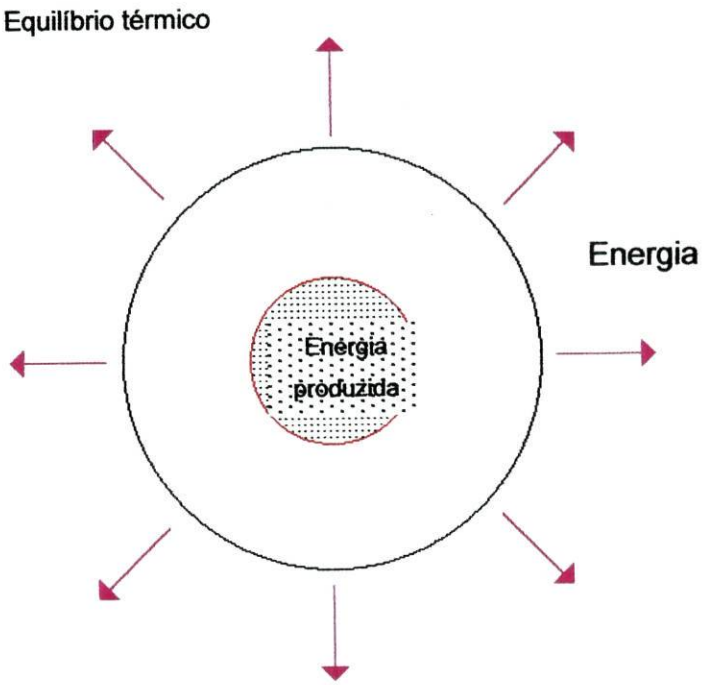


Figura 9.14 A energia produzida tem de ser irradiada. Se a produção de energia aumenta, a temperatura aumenta, então a pressão aumenta e a estrela expande – a área de superfície aumenta e mais energia é irradiada para o espaço para contrabalançar a produção.

✓ opacidade - a eficiência com a qual a energia libertada nas regiões centrais é irradiada para fora depende da transparência do meio gasoso no interior da estrela à propagação da luz. Se a opacidade é baixa, a luz propaga-se facilmente, chegando mais eficientemente à superfície da estrela e sendo irradiada. Se, ao contrário, a opacidade é grande, a luz tem mais dificuldade em se propagar pela estrela..

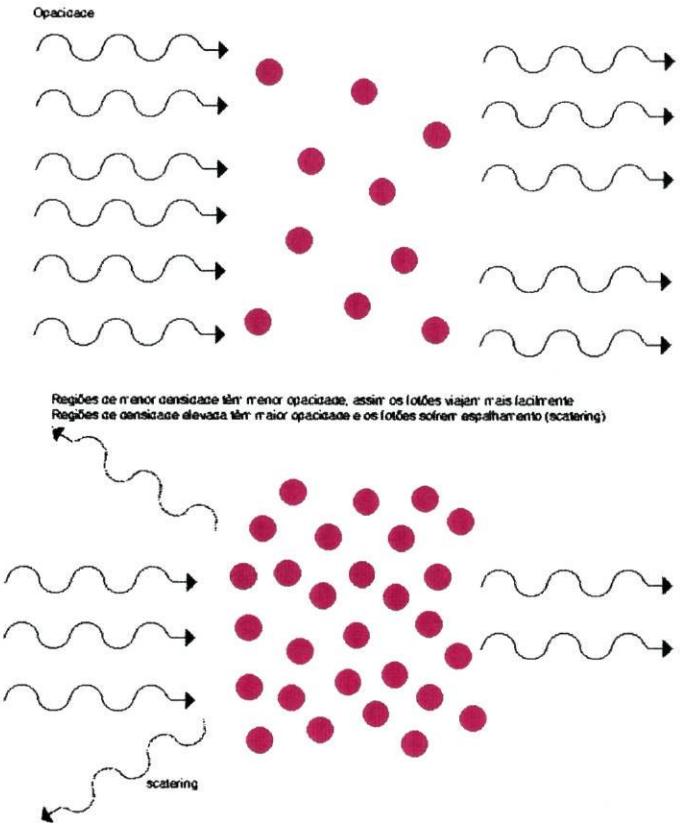


Figura 9.15 - Opacidade de uma estrela. Na parte superior representam-se regiões de menor opacidade, nestas os fotões viajam mais facilmente. Na parte inferior representam-se regiões de maior opacidade, nas quais os fotões têm maior dificuldade em se deslocar, pois sofrem espalhamento (scattering)

Retirada de
http://www.iagusp.usp.br/~jane/aga215/index.html

- ✓ transporte de energia – a energia não precisa de ser transportada necessariamente na forma de luz. A maneira pela qual se dá o transporte de energia do centro para fora determina a temperatura externa da estrela e a sua cor. O mecanismo que actua numa dada região da estrela é o que for mais eficiente para transportar a energia através dessa região.

Há três formas de se transportar energia de um ponto para outro num meio: condução, convecção e radiação. A condução representa o transporte de energia através de colisões entre as partículas do meio (as mais energéticas tendem a perder energia para as menos energéticas, transportando assim energia de um meio mais quente para outro mais frio). Este mecanismo é pouco comum nos interiores estelares. Já a convecção e a radiação são importantes e a opacidade ajuda a definir qual dos dois mecanismos opera e em que parte da estrela. Quando a temperatura é alta e os átomos estão ionizados a opacidade é menor e o transporte por radiação domina.

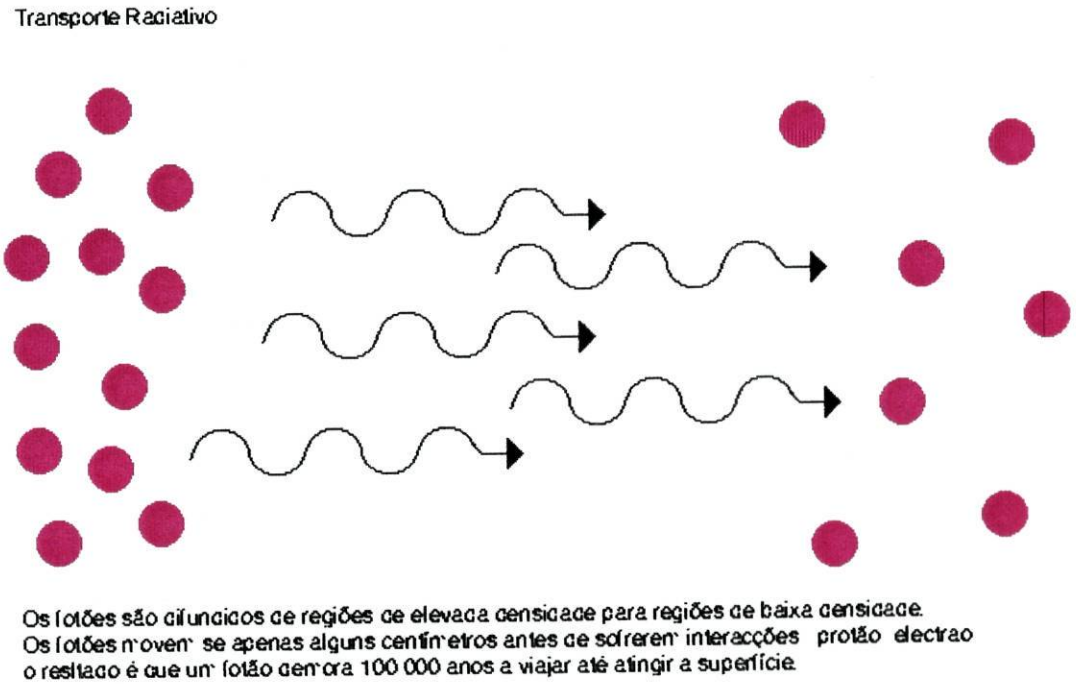


Figura 9.16- Transporte radiactivo
Retirada de http://www.iagusp.usp.br/~jane/aga215/index.html

Para temperaturas baixas, como nas camadas mais externas das estrelas, os protões e electrões estão unidos nos átomos neutros, ou de baixa ionização, sendo a opacidade mais alta. Isso diminui a eficiência do mecanismo de transporte por radiação, sendo este mecanismo então substituído pela convecção. Neste caso, a energia térmica é transportada pelo movimento turbulento do próprio gás, das regiões mais quentes para as mais frias. Ao chegar à superfície da estrela, as "bolhas" formadas no movimento convectivo libertam energia.

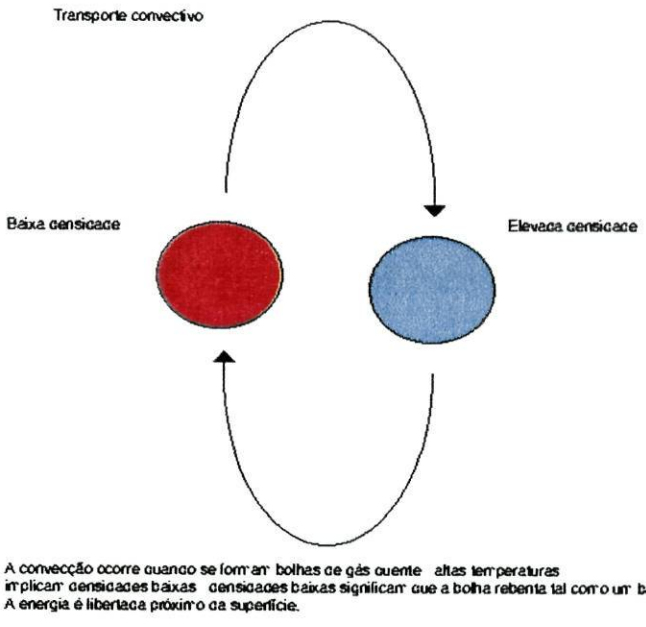


Figura 9.17 Transporte convectivo
Retirada de http://www.iagusp.usp.br/~jane/aga215/index.html

O mecanismo de transporte de energia também depende da variação da produção de energia no interior da estrela.

- ✓ produção de energia- no caso de estrelas, a energia é produzida por fusão termonuclear. Durante a maior parte da existência da estrela, ocorrem reacções de fusão de hidrogénio em hélio. Há três ciclos de reacções que levam a este resultado, e estes serão discutidos em mais detalhe quando tratarmos da evolução estelar.

Estes 5 itens, quantificados por fórmulas matemáticas, descrevem como a energia é produzida e é transportada até à superfície da estrela, bem como a forma como ela determina a estrutura interna da estrela.

9.2.1 Interiores Estelares:

Uma estrela pode ser dividida em duas regiões básicas: a atmosfera e o interior. A primeira engloba as camadas mais externas da estrela, onde a densidade e pressão são menores. O interior contém quase toda a massa da estrela e é nas suas regiões centrais que se dão as reacções de fusão nuclear. O interior pode, portanto, ser subdividido numa região central, o núcleo, um envelope radiactivo e um envelope convectivo. Já a atmosfera se subdivide em fotosfera, cromosfera e coroa. Os limites destas regiões não são necessariamente bem definidos e as

regiões variam de tamanho entre uma estrela e outra. Por exemplo, as estrelas quentes têm zonas radiactivas maiores e zonas convectivas menores relativamente às estrelas mais frias.

Assim:

- região central – é onde se produz a energia via reacções nucleares.
- envelope radiactivo- é onde a energia é transportada maioritariamente por radiação.
- envelope convectivo- é a região no interior estelar onde a energia é transportada maioritariamente por convecção.
- fotosfera – é uma fina camada externa, onde tem origem a maioria da luz emitida pela estrela. É onde se originam fenómenos como manchas, flares e protuberâncias (ver texto sobre o Sol).
- cromosfera – é uma região rarefeita da atmosfera da estrela onde ocorre a transição entre fotosfera e coroa.
- coroa – é uma região extremamente rarefeita e quente, de onde emana o vento estelar.

9.2.2 Cromosferas estelares:

A cromosfera é uma região de coloração alaranjada acima da fotosfera. O espectro da cromosfera, contrariamente ao da fotosfera, é um espectro de emissão, o que indica a presença de gás quente e ionizado (temperatura de 20,000 K ou mais). Os fenómenos mais complexos e efémeros que ocorrem na atmosfera de uma estrela, com origem na fotosfera, ocorrem na cromosfera, incluindo-se: flares, arcos, protuberâncias. Estes fenómenos estão ligados à actividade estelar, pequenas variações na luminosidade e no campo magnético da estrela.

9.2.3 Coroa Estelar

A coroa é um vasto halo de gás em emissão. O gás coronal é muito quente (temperaturas da ordem de um milhão de graus) e está em evaporação, formando o vento estelar.

O vento estelar é um constante fluxo de partículas subatómicas movendo-se a velocidades maiores do que a velocidade de escape da superfície da estrela. As

partículas escapam por janelas na coroa, onde o campo magnético é mais fraco e as partículas carregadas não estão presas a ele.

Imagens de raios-x e no ultravioleta da coroa solar mostram que o gás quente está associado às estruturas do campo magnético da fotosfera. Estas estruturas estendem-se em longas cadeias em direcção à coroa e aquecem-na à sua temperatura de um milhão de graus aproximadamente.

9.2.4 Degenerescência

Os gases normalmente obedecem à *Lei dos gases ideais*. Por esta lei, a pressão, temperatura e densidade estão correlacionados; aumentando-se a temperatura e a densidade, por exemplo, aumenta-se a pressão no gás. Contudo, quando os átomos (ou iões e electrões) são comprimidos a uma densidade extrema, começam a operar alguns efeitos da mecânica quântica que alteram o comportamento do gás. Em particular, o Princípio de Exclusão de Pauli e o Princípio da Incerteza limitam o número de partículas livres que podem ser colocadas num volume unitário e que tenham a mesma velocidade. Quando esta densidade limite é alcançada, as partículas só podem ser comprimidas se tiverem velocidades mais altas do que normalmente teriam. Isso leva a um aumento da pressão do gás que é independente da sua temperatura. A este fenómeno chama-se d*egenerescência*. Este fenómeno ocorre somente com densidades elevadas, como, por exemplo, aquela que teríamos se toda a massa da Terra fosse comprimida dentro do volume de um estádio de futebol.

9.3 Formação de Estrelas

Numa galáxia podem existir várias regiões de formação, consideradas berçários de estrelas, que são as nuvens de gás e poeira.

As estrelas formam-se dentro de concentrações relativamente densas de gás e poeira interestelar, conhecidas como nuvens moleculares. São regiões extremamente frias (temperatura da ordem de 10 a 20K, próximas portanto do zero absoluto). A essas temperaturas, gases tornam-se moleculares, ou seja, os átomos agrupam-se para formar moléculas. CO e H_2 são as moléculas mais comuns nas nuvens de gás interestelar. A temperatura baixa também favorece a aglomeração do gás a densidades mais altas. Quando a densidade atinge um valor limite formam-se as estrelas.

A alta densidade das regiões onde se formam as estrelas impede a passagem de luz visível. Essas regiões, opacas à luz visível, são chamada de nebulosas escuras. Como não vemos a luz visível dessas regiões, temos que usar o infravermelho ou o domínio de rádio para estudá-las.

A formação estelar inicia-se quando as regiões mais densas das nuvens moleculares colapsam sob a acção da sua própria gravidade. Tais regiões têm tipicamente uma massa de 10^4 massas solares na forma de gás e poeira. Essas regiões, geralmente no centro da nuvem molecular, são mais densas do que as partes mais externas, o que faz com que colapsem primeiro. À medida em que colapsam, as regiões centrais fragmentam-se em pedaços, cada um com cerca de 0.1 parsec de extensão e contendo de 10 a 50 massas solares. Esses fragmentos formam então as protoestrelas.

Este é o processo genérico da formação estelar. No entanto, os detalhes são diferentes, conforme se trate de formação de estrelas de pequena ou grande massa.[15]

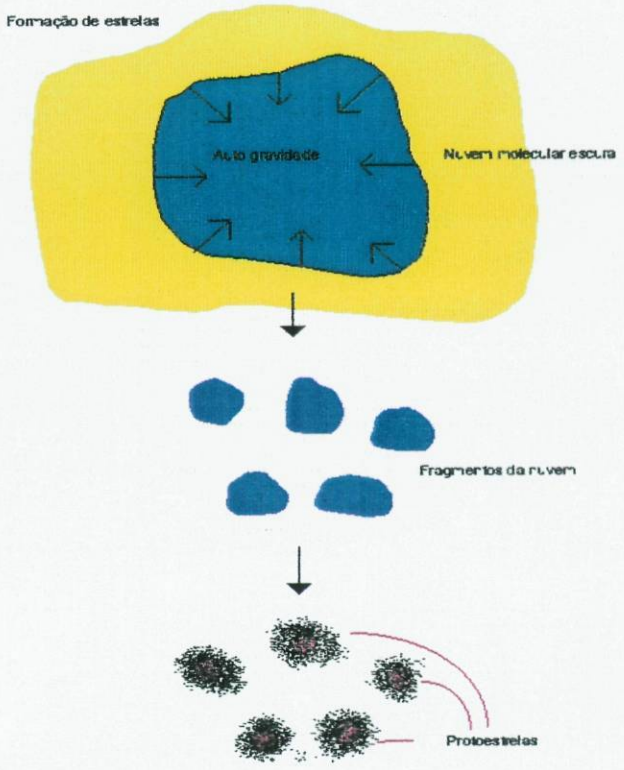


Figura 9.17 – Formação de protoestrelas

Adaptada de http://www.iagusp.usp.br/~jane/aga215/index.html

[15] Mais informações sobre este processo ver "Stellar Astrophysics-vol 3" Erika Böhm-Vitense

A escala de tempo envolvida neste processo de colapso das regiões centrais das nuvens moleculares e de formação de estrelas é de milhões de anos.

Como sabemos que tal processo realmente ocorre se ele dura tanto tempo e se dá no interior de nuvens escuras? A maioria das regiões onde se formam as estrelas são fontes de infra-vermelho, o que indica a presença de gás em contracção e aquecimento, pela conversão de energia potencial gravitacional em energia interna. Além disso, onde se encontram estrelas jovens, também se vêm nuvens de gás em seu redor, o resíduo da nuvem molecular escura após a formação das estrelas. As estrelas jovens são vistas em aglomerados, o que é compatível com a formação de estrelas a partir de fragmentos de uma mesma região no interior de uma nuvem molecular.

9.3.1 Protoestrelas:

Uma vez que um fragmento se destaca das outras partes da região de formação estelar, podemos considerá-lo como um objecto bem definido, com identidade própria e campo gravitacional diferenciado do restante da nuvem. Chamamos a este objecto protoestrela. À medida que se forma a protoestrela, o gás cai em direcção ao seu centro. O gás em contracção converte energia cinética em energia interna (calor), fazendo com que tanto a sua pressão quanto a sua temperatura aumentem. Ao atingir alguns milhares de graus de temperatura, a protoestrela torna-se uma fonte de infra-vermelho.

Vários candidatos a protoestrela foram observados pelo telescópio espacial Hubble no interior da nebulosa de Órion.

Durante o colapso inicial, o fragmento é transparente à radiação e o colapso dá-se rapidamente. À medida que se torna mais denso, o fragmento torna-se opaco. A radiação infra-vermelha não escapa do interior da protoestrela e a temperatura e pressão no centro começam a aumentar mais rapidamente. No momento em que a pressão é suficientemente grande para conter o colapso o objecto torna-se uma protoestrela estável.

A protoestrela, inicialmente, tem apenas algo como 1% da sua massa final; o material continua a cair em direcção ao centro da protoestrela, acumulando-se nas suas regiões mais externas. Após alguns milhões de anos, reacções de fusão termonuclear iniciam-se no seu centro. Um forte vento estelar (radiação e partículas) é produzido, dando assim fim à queda do gás em direcção ao centro.

A protoestrela é agora considerada uma estrela jovem, já que a sua massa não se altera mais e a sua evolução futura está definida.

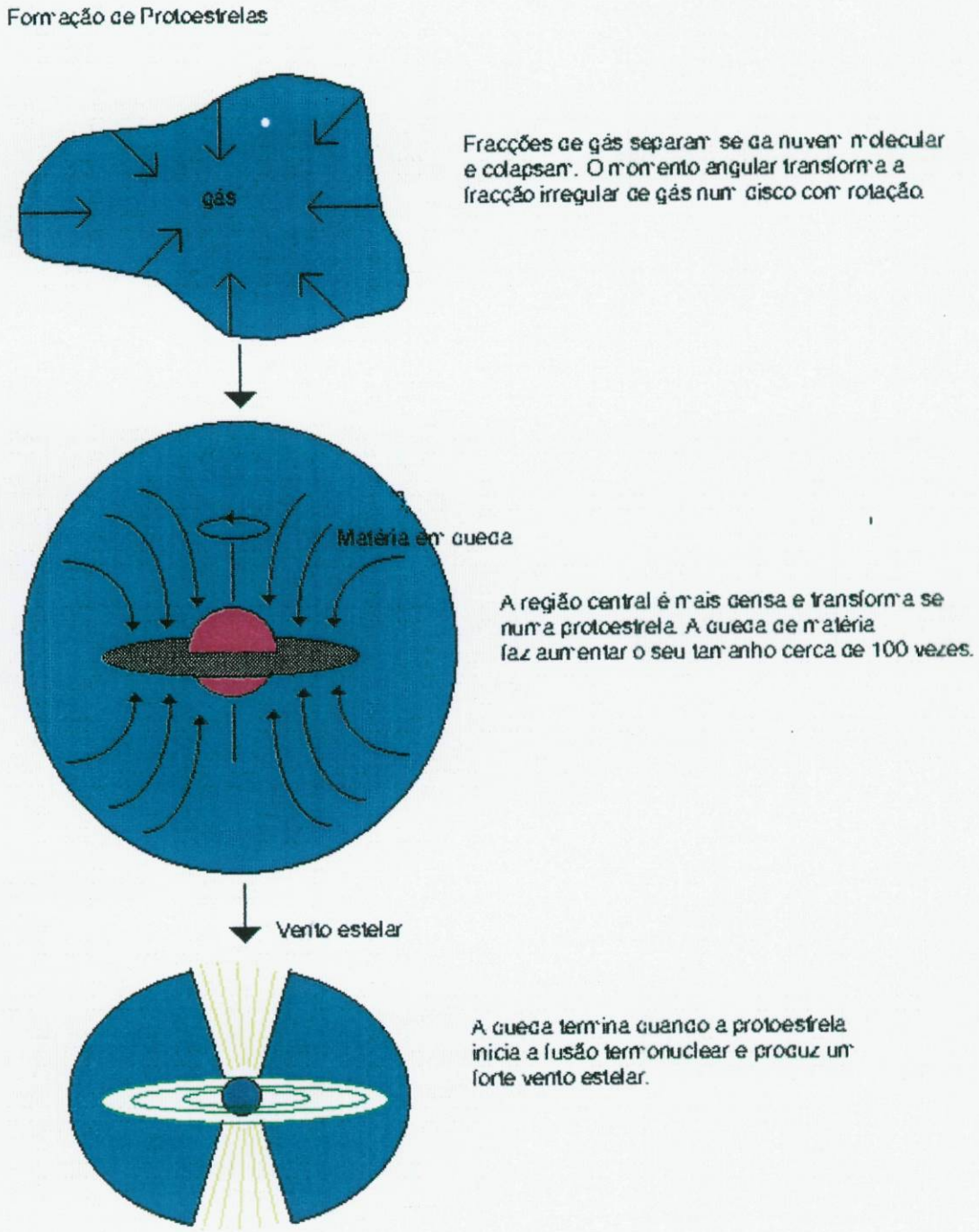


Figura 9.18 – Formação de protoestrela
Adaptada de http://www.iagusp.usp.br/~jane/aga215/index.html

Estrelas nestas fases iniciais (chamadas de T-Tauri) são encontradas na maior parte das vezes no interior de nuvens de gás das quais nascem. Um exemplo é o aglomerado do Trapézio no interior da Nebulosa de Órion.

As estrelas jovens evoluem a partir de um aglomerado de protoestrelas mergulhadas nas regiões centrais de uma nuvem molecular e tornam-se um aglomerado de estrelas T-Tauri cuja superfície quente e ventos estelares fortes aquecem o gás à sua volta e formam uma região HII (HII - hidrogénio ionizado). Posteriormente, o aglomerado quebra-se, o gás é expelido e as estrelas evoluem conforme se mostra abaixo.

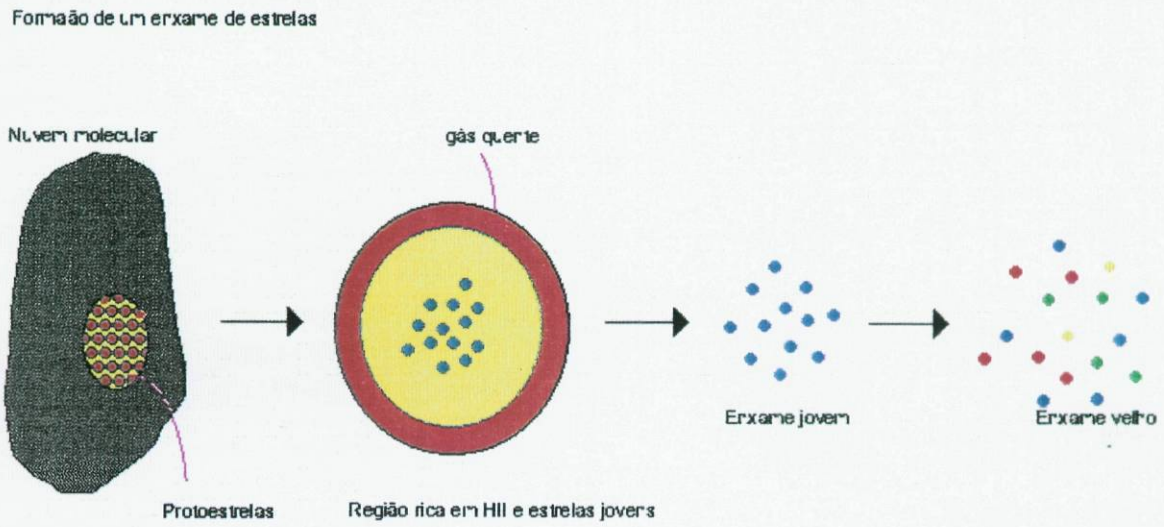


Figura 9.19– Formação de enxames de estrelas
Retirada de http://www.iagusp.usp.br/~jane/aga215/index.html

Frequentemente encontram-se aglomerados de estrelas jovens próximos de outras estrelas jovens. Tal fenómeno deve-se à formação estelar induzida por supernovas. As estrelas muito massivas são as primeiras a formarem-se no interior de uma nuvem e terminam a sua vida como supernovas. A explosão da supernova forma ondas de choque no interior da nuvem molecular, comprimindo o gás mais denso e levando-o a formar novas estrelas. Tal fenómeno leva a uma formação coerente de estrelas (estrelas jovens encontradas próximas a outras estrelas jovens), sendo responsável pelo padrão de distribuição coerente de estrelas jovens que vemos em várias galáxias. Essa situação é representada em diagrama pela figura abaixo, onde (a), (b) e (c) são etapas sucessivas de formação estelar induzida.

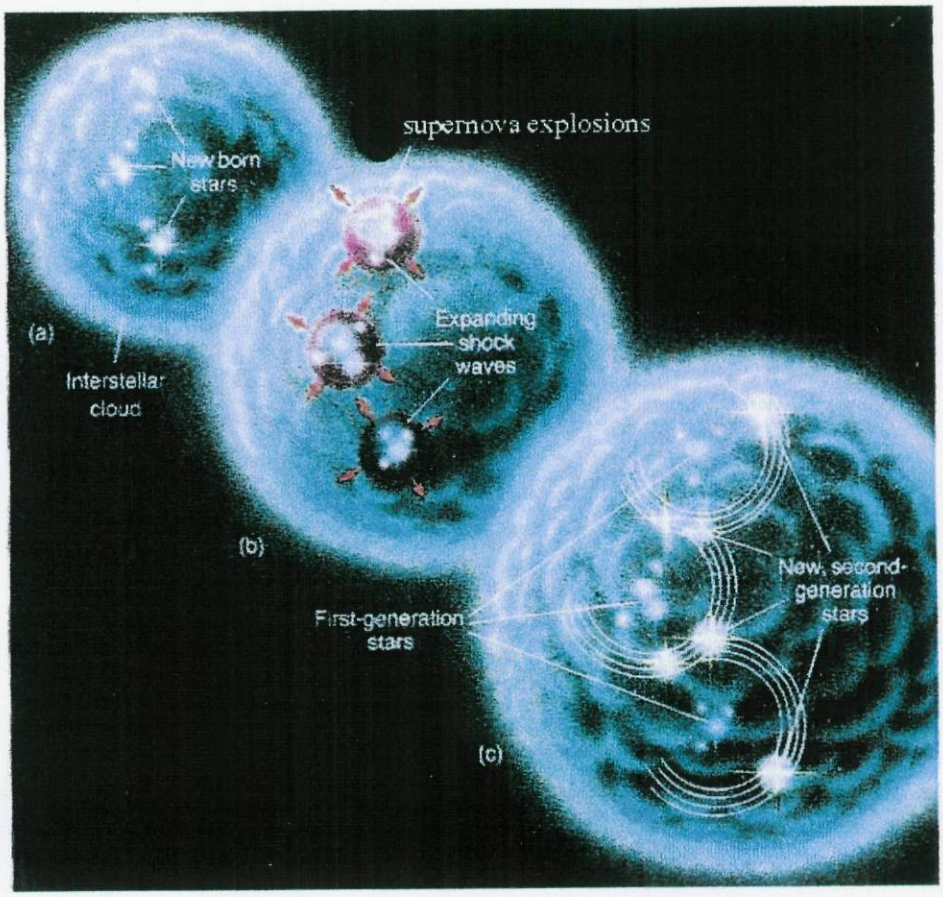


Figura 9.20- Formação estelar induzida
Retirada de http://www.iagusp.usp.br/~jane/aga215/index.html

9.3.1.1 Trajectória evolutiva no diagrama HR de uma protoestrela

Seguindo a trajectória evolutiva de uma protoestrela no Diagrama H-R[16], verifica-se que ela "caminha" para a esquerda (indicando o aumento da temperatura) e para cima (aumento da luminosidade). Por causa da elevada temperatura e pressão, aumenta a força no sentido de expulsar o material, e esta é balanceada pela força gravitacional, que tende a contrair a estrela. Quando o equilíbrio entre pressão e gravidade é atingido na região central, os grãos de poeira evaporam-se e o gás torna-se opaco, não permitindo a saída directa da radiação do objecto central. As camadas mais externas continuam a contrair-se, a área superficial diminui, causando uma diminuição da luminosidade e a trajectória move-se para baixo no Diagrama H-R.

[16] Cada par de luminosidade e temperatura corresponde a um ponto no diagrama H-R, ver secção 9.5.2.11 – Trajectórias evolutivas no diagrama HR (Hertzprung-Russell)

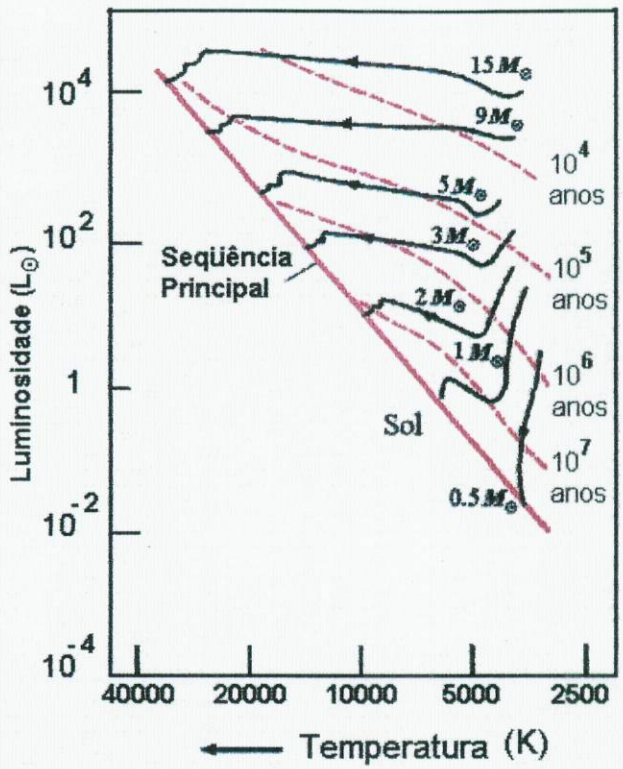


Figura 9.21- Diagrama H-R mostrando as trajectórias evolutivas na fase pré- sequência principal para estrelas de diferentes massas. As linhas tracejadas indicam o tempo de evolução.
Retirada de http://www.iagusp.usp.br/~jane/aga215/index.html

9.3.2 Emissão de radiação em estrelas jovens

As grandes quantidades de gás e poeira ao redor das estrelas em formação impedem que se observe directamente a radiação desses objectos, tornando-os "invisíveis" para telescópios ópticos. Isso ocorre porque os grãos de poeira absorvem a radiação emitida pelo objecto central e reemitem em comprimentos de onda "mais frios", na faixa do infravermelho. O nascimento de uma estrela é marcado pelo início das reacções nucleares no seu interior e o momento em que ela se torna visível.

Para algumas estrelas "recém-nascidas" ainda ocorrem processos de colapso gravitacional e passagem de matéria da nuvem mãe para a estrela. Diz-se que elas se encontram na pré- sequência principal.

Uma das categorias de estrelas que ainda estão por chegar à maturidade é conhecida como **T Tauri**.[17] Essas estrelas têm massas menores que 3 $M_{\odot}$ e tipos espectrais de F até M (temperaturas de $7x10^3$ a $4\ x10^3$ K). Por estarem ainda a passar por processos de "acréscimo" (queda) e ejecção de matéria, as T Tauri

[17] Para mais informações consultar "T Tauri Stars Pictured at Ultraviolet and X-rays – Costa, Vitor Manuel Moreira, Dep. Matemática Aplicada FCUP Março de 2000

apresentam grande variabilidade de brilho e forte emissão infravermelha e ultravioleta.

Associadas a grupos de T Tauri encontram-se frequentemente nebulosidade de gás e poeira, com formato de "nódulos", que mostram espectaculares jactos de matéria, quando observados em comprimentos de ondas rádio. Essas compactas regiões indicadoras de formação estelar são conhecidas como **Objetos Herbig-Haro**. A estrutura (forma, tamanho) e o brilho dos objectos Herbig-Haro variam continuamente. Acredita-se que estas alterações indiquem os estágios finais da fase de contracção na pré- sequência principal.

Estrelas pré- sequência principal mais quentes que as T Tauri são as estrelas de massa intermediária (2-8 $M_{\odot}$) conhecidas como estrelas dos tipos **Ae/Be de Herbig**, que também são circundadas por poeira, apresentando um espectro de emissão não encontrado normalmente em estrelas de tipo espectral semelhante (temperaturas da ordem de 10^4 K).

Estrelas ainda mais massivas formam-se tão rapidamente que não passam pela pré- sequência principal. As de tipo O e B são as mais quentes e mais luminosas, com temperaturas superficiais de 15 x10^3 a 35 x10^3 K, emitindo fortemente radiação ultravioleta.

9.3.3 Aglomerados Estelares

A infância de um grupo de estrelas jovens, também conhecido como **aglomerado aberto**, pode ser avaliada através de estudos individuais. A partir das medidas de magnitude e índices de cor para cada membro do grupo, pode-se deduzir luminosidades e temperaturas e determinar a idade do aglomerado. Na Figura 9.22, que representa o Diagrama H-R do aglomerado jovem NGC2264, nota-se que as estrelas com temperatura em torno de 2x10^4 K já chegaram à sequência principal. As estrelas mais frias que 10^4K estão na fase final da pré- sequência principal, a sofrer ainda colapso gravitacional e já tiveram início recentemente no seu interior as reacções termonucleares. Os resultados para NGC2264 indicam uma idade de aproximadamente 2 x10^6 anos.

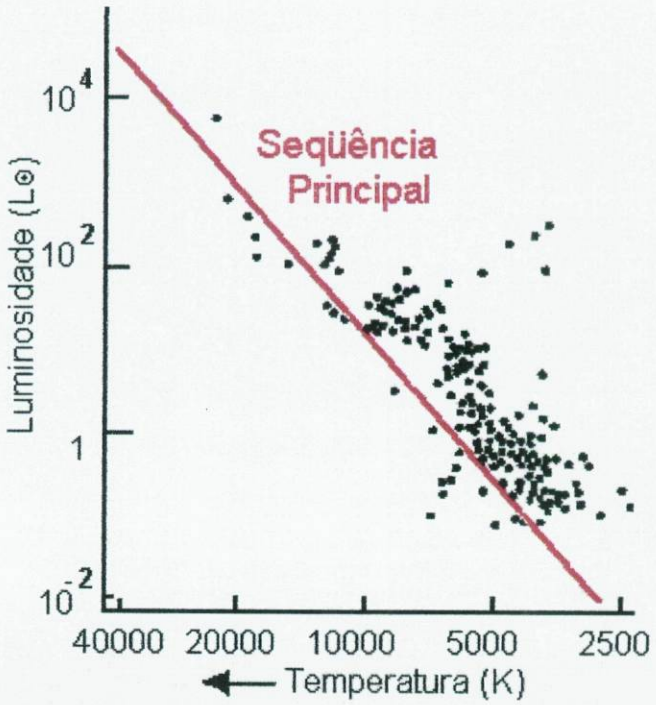


Figura 9.22. Um diagrama H-R do aglomerado jovem NGC2264. Cada ponto do gráfico representa uma estrela do aglomerado, para a qual foram determinadas luminosidade e temperatura. Retirada de http://www.iagusp.usp.br/~jane/aga215/index.html

Alguns indícios de actividade (associados aos processos de formação) podem ainda ocorrer mesmo depois da estrela ter chegado à sequência principal. Para o aglomerado das Pleiades (idade estimada em 10^8 anos) observa-se ainda alguns eventos de perda de massa em algumas de suas estrelas.

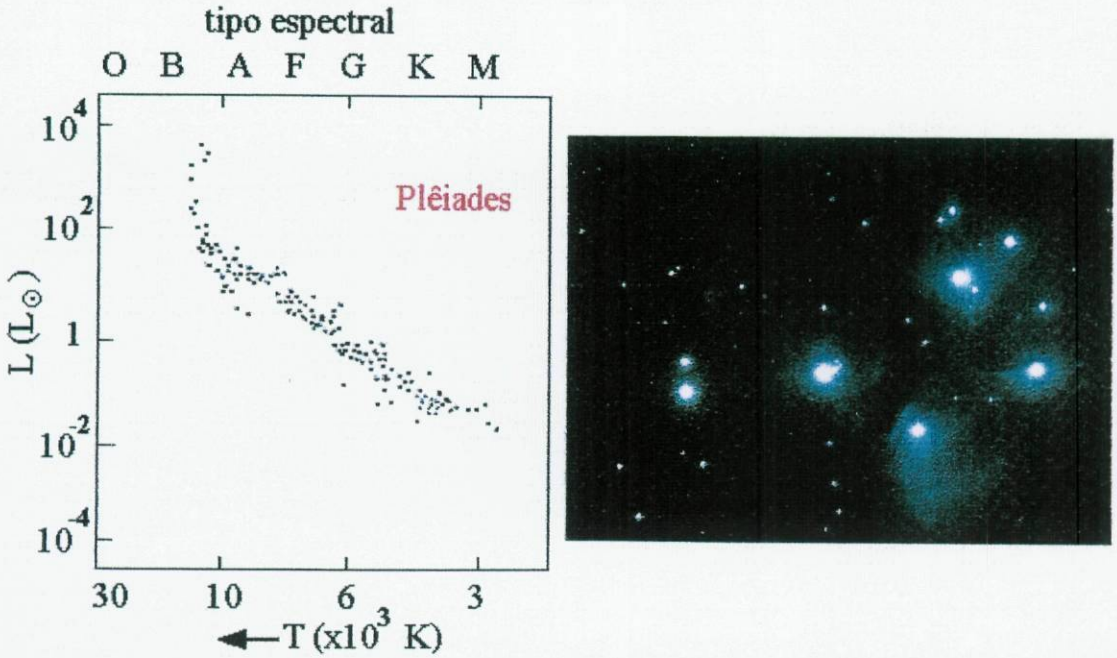


Figura 9.23. O aglomerado aberto das Plêiades e seu Diagrama H-R. Retirada de http://www.iagusp.usp.br/~jane/aga215/index.html

Em contraste com os aglomerados abertos, existe um outro tipo de aglomerado estelar que é designado **aglomerado globular.** Estes contêm até alguns milhões de estrelas velhas numa região de cerca de 50pc, numa distribuição aproximadamente esférica. A Figura 9.24 mostra o Diagrama H-R para o aglomerado globular Omega Centauri. Nota-se uma clara ausência de estrelas de grande massa, como as gigantes azuis e brancas. Como esse aglomerado é muito antigo, as estrelas de tipos O e B (as quais consomem seu combustível num tempo muito curto) já desapareceram da sequência principal.

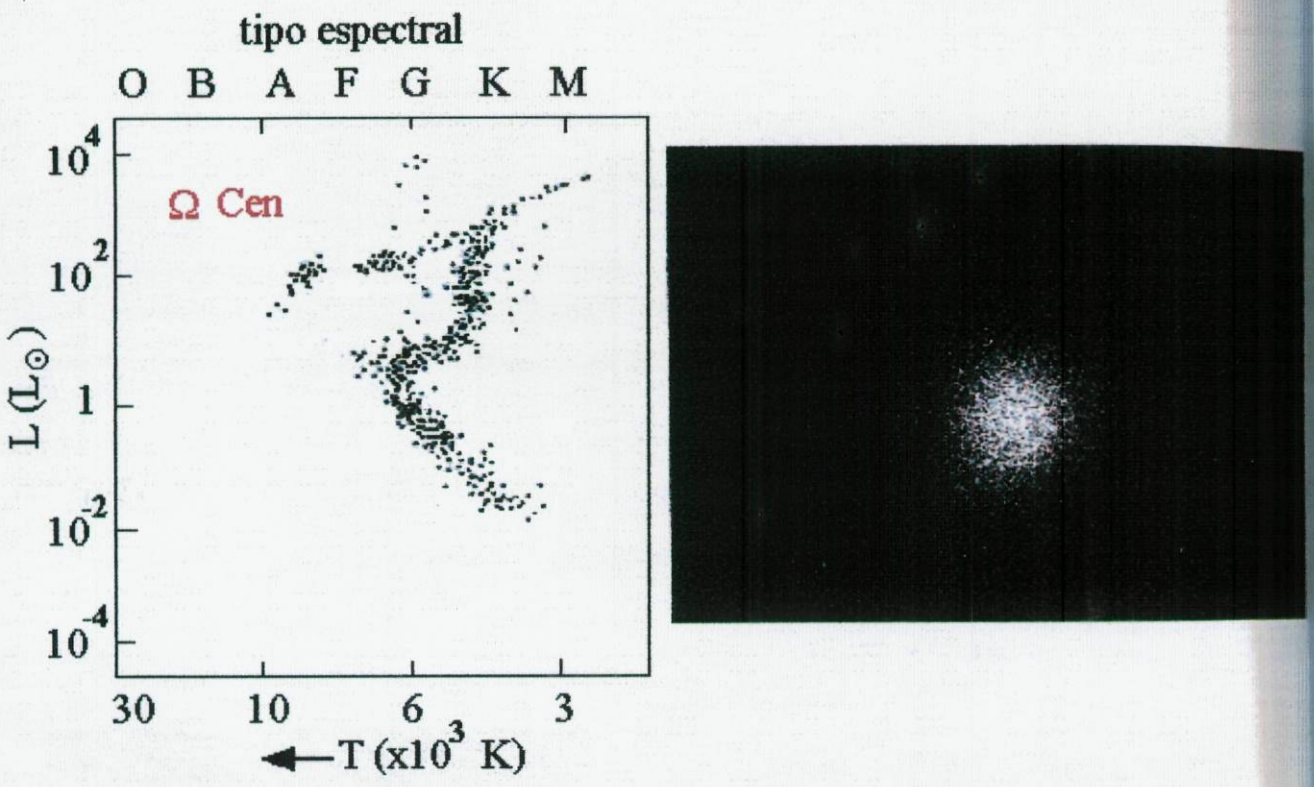


Figura 9.24- O aglomerado globular Omega Centauro e seu Diagrama H-R.
Retirada de http://www.iagusp.usp.br/~jane/aga215/index.html

9.3.4 Origem da energia estelar[18]

Quando a parte central da protoestrela fica quente o suficiente, iniciam-se os processos de fusão nuclear, que geram a energia necessária para a estrela se sustentar. Basicamente os processos de fusão envolvem 4 núcleos de hidrogénio que se fundem, para formar 1 núcleo de hélio. Enquanto o hidrogénio tem apenas 1 protão no seu núcleo, o hélio possui 2 protões e 2 neutrões, sendo a massa do núcleo formado um pouco menor que a soma das massas dos 4

[18] Para maiores desenvolvimentos sugere-se a consulta de "Introduction to Stellar astrophysics-vol 3" Erika Böhm-vitense.

núcleos utilizados. É essa diferença de massa (0.007 da massa inicial) que será convertida em energia no interior estelar. Como na sequência principal, 90% dos átomos de uma estrela são de hidrogénio, ela tem armazenada uma grande quantidade de combustível para ser "queimado".

As cadeias de reacções nucleares propostas para explicar a fusão dos 4 núcleos de hidrogénio em 1 de hélio dependem da temperatura a que se encontra o interior estelar. A chamada cadeia "protão- protão" domina as estrelas mais frias, incluindo o Sol, enquanto que o ciclo do carbono é dominante nas estrelas mais quentes. Nos casos em que o hélio já foi formado e as temperaturas são muito elevadas ocorre o chamado processo "triplo-alfa".

9.3.4.1 Cadeia protão- protão

Esta é a cadeia dominante em estrelas cuja temperatura central é menor que 15×10^6 K. Inicialmente dois átomos de hidrogénio fundem-se para formar um núcleo de deutério, um positrão e um neutrino. O neutrino escapa imediatamente da estrela, enquanto que o positrão colide logo com um electrão e ambos são aniquilados, formando raios gama.

Em seguida o núcleo de deutério funde-se com um outro átomo de hidrogénio, para se transformar num isótopo de hélio com 2 protões e 1 neutrão, libertando ainda energia na forma de raios gama. Por fim, dois desses isótopos fundem-se para formar um átomo de hélio e dois núcleos de hidrogénio. Sendo assim, um total de 6 núcleos de hidrogénio estão envolvidos nas reacções, mas apenas 4 deles são utilizados para formar o hélio.

A sequência referida anteriormente para as cadeias PP, é apenas um das três possíveis. Embora os dois passos iniciais sejam os mesmos, a sequência depois pode seguir três caminhos, sendo que 86% das reacções seguem a cadeia PPI, 14% a cadeia PPII e 0,02% a cadeia PPIII. Os produtos resultantes das reacções são além do hélio, energia sob a forma de fotões e os neutrinos.

Cadeia PPI:

$$ {}_1^1H + {}_1^1H \rightarrow {}_1^2H + \upsilon + e^+ \quad (1.4 \times 10^{10} \text{ anos}) $$

$$ {}_1^2H + {}_1^1H \rightarrow {}_2^3He + \gamma \quad (6 \text{ segundos}) $$

$$ {}_2^3He + {}_2^3He \rightarrow {}_2^4He + {}_1^1H + {}_1^1H \quad (10^6 \text{ anos}) $$

Cadeia PPII:

$$^{1}_{1}H+^{1}_{1}H\rightarrow^{2}_{1}H+\upsilon+e^{+} \quad (1.4\text{x } 10^{10} \text{ anos})$$

$$^{2}_{1}H+^{1}_{1}H\rightarrow^{3}_{2}He+\gamma \text{ (6 segundos)}$$

$$^{3}_{2}He+^{4}_{2}He\rightarrow^{7}_{4}Be+\gamma$$

$$^{7}_{4}Be+e^{-}\rightarrow^{7}_{3}Li+\nu$$

$$^{7}_{3}Li+^{1}_{1}H\rightarrow 2\ ^{4}_{2}He$$

Cadeia PPII:

$$^{1}_{1}H+^{1}_{1}H\rightarrow^{2}_{1}H+\upsilon+e^{+} \quad (1.4\text{x } 10^{10} \text{ anos})$$

$$^{2}_{1}H+^{1}_{1}H\rightarrow^{3}_{2}He+\gamma \text{ (6 segundos)}$$

$$^{3}_{2}He+^{4}_{2}He\rightarrow^{7}_{4}Be+\gamma$$

$$^{7}_{4}Be+^{1}_{1}H\rightarrow^{8}_{5}B+\nu$$

$$^{8}_{5}B\rightarrow^{8}_{4}Be+\nu+e^{+}$$

$$^{8}_{4}Be\rightarrow 2\ ^{4}_{2}He$$

A importância relativa das cadeias PPI e PPII depende da importância relativa da reacção do ^{3}He com o ^{3}He na PPI quando comparada com a reacção do ^{3}He com o ^{4}He na PPII. Para temperaturas superiores a 1.4x10^{7}K, o ^{3}He prefere reagir com o ^{4}He. Para temperaturas inferiores a cadeia PPI é a mais importante. A cadeia PPIII não é muito importante, no entanto gera neutrinos muito energéticos. Para as temperaturas do interior solar a cadeia PPIII é muito sensível à temperatura pois envolve reacções de núcleos com Z=4. Assim o número de neutrinos de elevada energia gerado nestas cadeias está muito dependente da temperatura.

Uma vez que os neutrinos podem escapar livremente do Sol sem interagirem com o material solar, a sua energia é perdida para o aquecimento solar. Como os neutrinos gerados nas três cadeias têm diferentes energias, diferentes fracções energéticas são perdidas no seu percurso. As perdas de energia dos

neutrinos são de cerca de 1.9% para os da cadeia PPI, 3,9% para os da cadeia PPII e 27,3% para os da cadeia PPIII.[19]

9.3.4.2 Ciclo do Carbono, oxigénio e nitrogénio

Para temperaturas superiores reacções que envolvem núcleos com maior número atómico (z), podem ocorrer, especialmente nas zonas de ressonância. As zonas de ressonância ocorrem quando a energia cinética do nucleão capturado coincide com um nível excitado dos núcleos combinados, isto faz com que a formação dos núcleos combinados seja muito fácil.

Este ciclo inicia-se com a fusão de um núcleo de hidrogénio com um núcleo de carbono. Depois de várias etapas em que são utilizados 4 núcleos de hidrogénio, formam-se 1 núcleo de hélio e um de carbono, e um novo ciclo se pode iniciar.

$$^{12}_{6}C+^{1}_{1}H\rightarrow^{13}_{7}N+\gamma \quad (10^6 \text{ anos})$$

$$^{13}_{7}N\rightarrow^{12}_{6}C+e^{+}+\upsilon \quad (14 \text{ minutos})$$

$$^{13}_{6}C+^{1}_{1}H\rightarrow^{14}_{7}N+\gamma \quad (3\text{x}10^5 \text{ anos})$$

$$^{14}_{7}N+^{1}_{1}H\rightarrow^{15}_{8}O+\gamma \quad (3\text{x}10^8 \text{ anos})$$

$$^{15}_{8}O\rightarrow^{15}_{7}N+e^{+}+\upsilon \quad (82 \text{ segundos})$$

$$^{15}_{7}N+^{1}_{1}H\rightarrow^{12}_{6}C+^{4}_{2}He \quad (10^4 \text{ anos})$$

Tal como nas cadeias PP são possíveis diferentes fins para o ciclo.

$$^{15}_{7}N+^{1}_{1}H\rightarrow^{16}_{8}O+\gamma$$

$$^{16}_{8}O+^{1}_{1}H\rightarrow^{17}_{9}F+\gamma$$

---

[19] Para mais informações consultar "Introduction to Stellar Astrophysics – Vol 3 stelar struture and evolution – Erika Böhm –Vitenses, capitulo 8.

$$^{17}_{9}F \rightarrow ^{17}_{8}O + e^{+} + \nu$$

$$^{17}_{8}O + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{14}_{7}N + ^{4}_{2}He$$

Como o ciclo também pode ser iniciado pelo nitrogénio ou pelo oxigénio, o processo é chamado o ciclo carbono- nitrogénio ou ciclo CNO.

9.3.4.3 Processo triplo alfa

Para temperaturas ainda superiores, T~10^8K pode ocorrer a reacção

$$^{8}_{4}Be + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{12}_{6}C + 2\gamma + 7.6MeV$$

O núcleo do átomo de hélio, também chamado "partícula alfa", pode participar na produção de carbono em interiores estelares com temperaturas acima de 10^8K. Como 3 núcleos $^{4}_{2}He$ produzem um núcleo $^{12}_{6}C$, o processo é chamado "triplo-alfa".

$$^{4}_{2}He + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{8}_{4}Be$$

$$^{4}_{2}He + ^{8}_{4}Be \rightarrow ^{12}_{6}C + \gamma$$

Embora o primeiro passo necessite de energia, o global é positivo. Como esquematizado abaixo, basicamente três núcleos de hélio juntam-se para formar um núcleo de carbono.

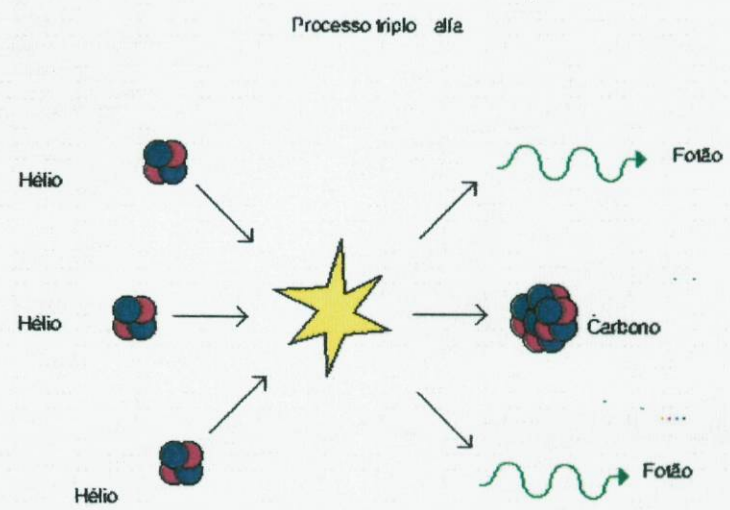


Figura 9.25-O processo triplo alfa

$$^{4}_{2}He+^{4}_{2}He+^{4}_{2}He\rightarrow^{12}_{6}C+\gamma+\gamma$$

As observações mostram que só se encontra abundância de elementos pesados em estrelas velhas. Actualmente observam-se estrelas cuja abundância relativa dos elementos pesados está reduzida de um factor 10^4 quando comparadas com o Sol. Isto sugere que a abundância dos elementos pesados aumentou durante a formação e evolução da Galáxia e que provavelmente a primeira geração de estrelas não possuía elementos pesados. Isto também é sugerido por estudos cosmológicos que mostram que durante as altas temperaturas na fase do bigbang não existiu tempo para que elementos mais massivos que o ^{4}He excepto alguns núcleos de Li. Os poucos núcleos ^{8}Be que provavelmente estiveram presentes eram poucos e o tempo muito curto para se formar ^{12}C na reacção tripla–alfa.

A primeira geração de estrelas consistia apenas de hidrogénio e hélio. O ciclo CNO não podia pois ocorrer, apenas as cadeias PPII.

Acredita-se que a síntese de isótopos dos elementos leves (hidrogénio, hélio, lítio e berilio) ocorreu nos primeiros minutos após a origem do Universo e que os elementos pesados foram formados em processos estelares.

9.4 EVOLUÇÃO ESTELAR

9.4.1 Anãs Castanhas

Se uma protoestrela se forma com uma massa de 0.08 massa solar ou menos, a sua temperatura central nunca atinge um valor suficientemente alto para que a fusão nuclear se inicie. A esta "estrela mal-sucedida" chama-se anã castanha, sendo um objecto intermédio entre uma estrela e um planeta (como Júpiter).

Apesar de não ocorrerem reacções de fusão nuclear nos seus interiores, as anãs castanhas ainda assim emitem luz, principalmente no infra-vermelho, devido à sua energia interna acumulada durante o colapso do gás na sua formação. Há energia térmica suficiente para permitir que a anã castanha brilhe por uns 15 milhões de anos (chamada a escala de tempo de Kelvin-Helmholtz). As anãs castanhas são importantes para a astronomia, pois devem ser o tipo mais comum de estrelas e podem contribuir com grande quantidade da matéria da Galáxia, sendo assim possivelmente a chave do *problema de matéria escura na*

Via-Láctea. Decorrido o tempo de Kelvin-Helmholtz, as anãs castanhas tornam-se invisíveis e arrefecem, tornando-se anãs pretas.

9.4.2 Pré- Sequência Principal: da juventude à meia-idade

Apesar de ser bastante longo, o período de vida de uma estrela é limitado. Mesmo uma estrela jovem passa por processos de intensa actividade, constantes modificações e instabilidade. Nessa fase sofre variações de temperatura, massa e diâmetro.

9.4.2.1 Trajectórias Evolutivas no Diagrama H-R

Vimos anteriormente que o tipo espectral de uma estrela é basicamente designado por uma das letras: **O, B, A, F, G, K e M**, sendo que cada uma dessas classes pode ser dividida em 10 sub-classes: B0, B1...B9 (com excepção da classe O, que tem sub-dividivisões de 5 a 9). Esta é uma sequência de cores (ou temperaturas efectivas), em que os primeiros tipos (O, B...) correspondem às estrelas mais quentes e mais azuladas e as dos últimos tipos (...K, M) são as mais frias e vermelhas.

O diagrama H-R é a forma de se comparar os parâmetros estelares, relacionados com o brilho (luminosidade e temperatura), entre os vários tipos de estrelas. Cada par de luminosidade e temperatura corresponde a um ponto no diagrama H-R. Se ligarmos todos os pontos representando a vida inteira de uma estrela estabelecemos a sua trajectória evolutiva.

As diferentes categorias de estrelas localizam-se em regiões específicas do diagrama H-R, que podem ser divididas em classes de luminosidade: I, II e III para gigantes, IV e V sub-gigantes e sequência principal.

Conhecendo-se a luminosidade (L) e a temperatura (T) de uma estrela, é possível posicioná-la (identificar o ponto L,T) no Diagrama H-R em qualquer fase da sua vida. Uma estrela em fase de formação, por exemplo, terá um par específico (L,T) enquanto ainda faltar 10^6 anos para o início da fusão nuclear no seu interior. Meio milhão de anos depois, o par (L,T) será outro.

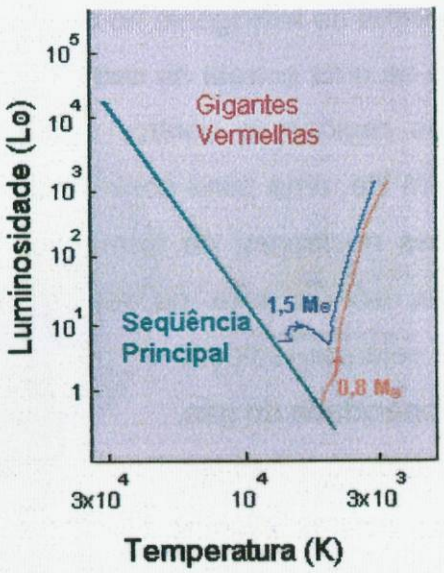


Figura 9.26 Um Diagrama H-R mostrando as trajectórias evolutivas de duas estrelas de massas diferentes. Retirada de http://www.iagusp.usp.br/~jane/aga215/index.html

9.4.3 Uma fase de estabilidade: a sequência principal

Quando a estrela chega à sequência principal ainda é relativamente jovem e a queima de hidrogénio no seu interior iniciou-se "recentemente". Na maioria dos casos, esta é uma fase duradoura e de relativa estabilidade. Para o Sol, por exemplo, o tempo total de permanência na sequência principal é cerca de 11 biliões de anos, um período durante o que ele fica tranquilamente a queimar hidrogénio no seu interior.

Para que a fusão nuclear se inicie, os núcleos devem estar suficientemente próximos uns dos outros, mas por serem todos de carga positiva a repulsão eléctrica entre eles impede a aproximação necessária e a fusão não ocorre.

No interior de uma protoestrela em contracção a temperatura cinética aumenta cada vez mais e portanto as partículas atingem altas velocidades. Dessa forma, alguns núcleos terão a energia necessária para superar a repulsão eléctrica, permitindo que os mesmos possam interagir.

Uma vez estabelecidos os processos termonucleares, eles auto controlam-se. Quando a produção de energia nuclear aumenta, é gerado um excesso de pressão, que origina a expansão da estrela. Com o aumento do tamanho, o gás no interior da estrela tende a arrefecer. Assim, a estrela acaba por encontrar a temperatura e o tamanho ideais para o equilíbrio, o que permite que ela fique estável por um longo período. Essa fase de estabilidade, pela qual a estrela passa durante a maior parte de sua vida, é a chamada sequência principal.

Uma vez que se inicie a queima do hidrogénio no centro de uma protoestrela, ela rapidamente evolui e torna-se uma estrela da sequência principal. O seu interior pode ser dividido em três regiões: o centro, no qual se dão as reacções nucleares de fusão de H em He, uma zona convectiva e uma zona radiactiva. A energia devida às reacções nucleares, na forma de raios gama, neutrinos e partículas de alta energia, só se gera na região central. Essa energia é transferida para fora, quer seja por radiação ou por convecção, dependendo da temperatura, densidade e opacidade do gás.

Esquematicamente vê-se como é o interior de 3 tipos de estrelas: uma de tipo espectral O, outra de tipo espectral G (como o Sol) e outra de tipo espectral M, na figura 9.27.

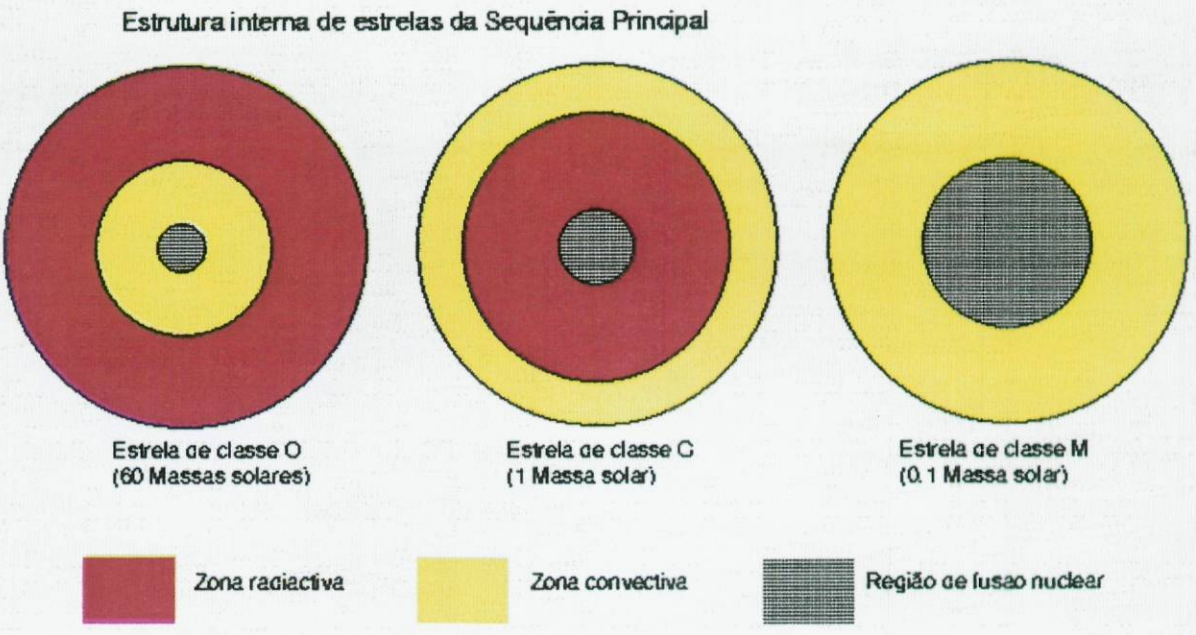


Figura 9.27– Representação da estrutura interna de estrelas da Sequência Principal

Uma estrela O é umas 15 vezes maior em raio do que uma estrela G, e uma estrela M tem 1/10 do tamanho do raio de uma G. Procura-se representar esta diferença de tamanho na figura 9.28.

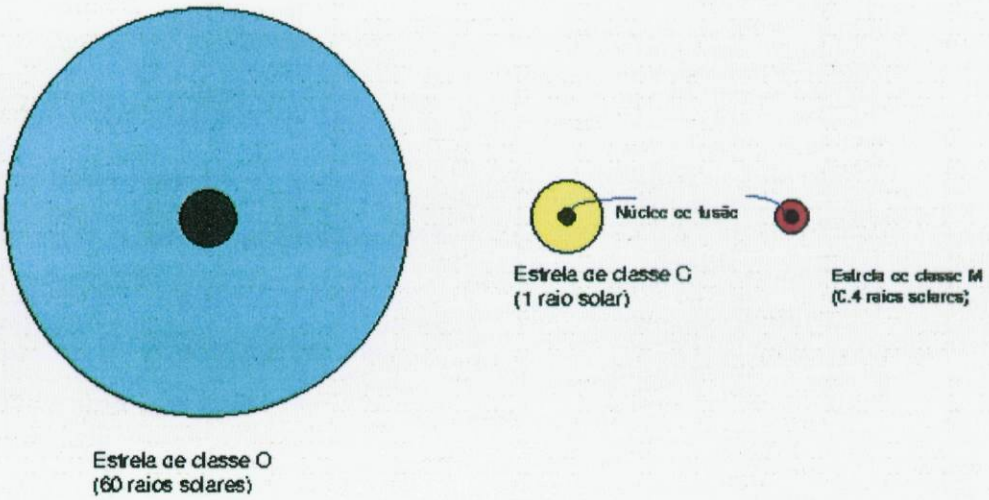


Figura 9.28– Esquema representativo do tamanho de estrelas da Sequência Principal

A região onde ocorrem as reacções ocupa uma fracção maior do interior da estrela quanto menor for a sua massa. As estrelas de grande massa têm regiões centrais bem pequenas e cercadas por um extenso envelope. A energia libertada na região central mantém o interior quente e produz a pressão necessária para contrabalançar a gravidade.

Pode-se pensar que, uma vez esgotado o hidrogénio no seu centro, uma estrela cesse de brilhar. Mas o esgotamento do hidrogénio é acompanhado pela produção de hélio. Dessa forma, a região central da estrela não fica vazia, mas é preenchida com "cinzas" de hélio.

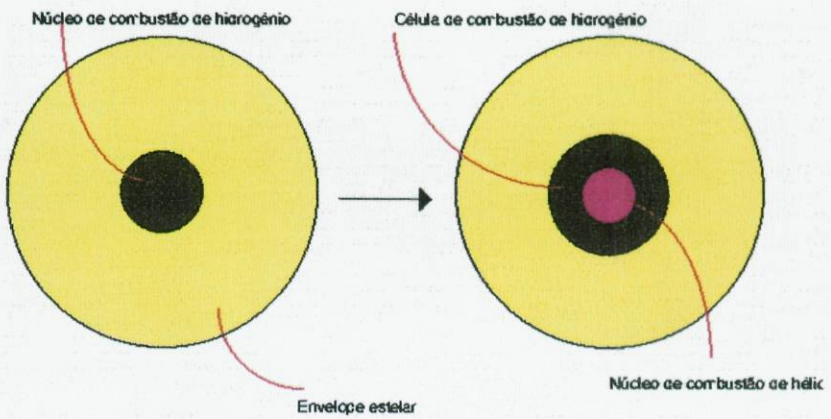


Figura 9.29 Núcleos de combustão

À medida que aumenta a quantidade de hélio no centro, a taxa de produção de energia diminui até cessar. O processo de fusão de hidrogénio em hélio desloca-se então para fora, no envelope de hidrogénio que envolve o núcleo de hélio. Os núcleos de hélio também podem ser consumidos pela fusão nuclear, mas a temperatura necessária para isso é de ~100 milhões de graus, muito maior do que a temperatura de fusão do hidrogénio (~2 milhões de graus). Para estrelas pequenas, esta temperatura nunca é atingida, de forma que o centro rico em hélio permanece dormente.

No início da sua existência, cerca de 74% da massa de uma estrela está na forma de hidrogénio, 25% em hélio e 1% nos demais elementos químicos. Pela fusão nuclear, a massa de hidrogénio diminui no centro. No Sol, por exemplo, passados 5 biliões de anos, apenas 29% da região central é de hidrogénio, estando 70% da massa do núcleo na forma de hélio. Ou seja, as reacções nucleares alteram a composição química no interior estelar.

Sendo as regiões centrais muito massivas, decorrem centenas de milhares até biliões de anos para que se esgote o hidrogénio nelas contido. Obviamente, as estrelas que produzem mais energia, consomem-no mais rapidamente e, portanto, esgotam-se em menos tempo. As estrelas de maior massa são as mais luminosas, tendo assim um tempo de vida na sequência principal mais curto: uns 10 milhões de anos para as estrelas mais massivas, com cerca de 20 ou 30 massas solares. Já estrelas como o Sol duram 10 biliões de anos e estrelas com 0.1 massa solar, duram dezenas de biliões de anos nessa fase de fusão do hidrogénio.

9.4.4 Gigantes e Supergigantes Vermelhas

À medida que decresce a quantidade de hidrogénio na região central, diminui a produção de energia pelas reacções termonucleares. A tendência é então haver uma diminuição da temperatura e pressão na região central. Esta diminuição da pressão leva à contracção da região central, o que reverte a tendência da diminuição da temperatura. O aquecimento realimenta então a taxa com que ocorrem as reacções de fusão no centro. Cria-se também um envelope (ou camada) ainda rico em hidrogénio em volta do núcleo, que começa a converter hidrogénio em hélio. Ao esgotar-se totalmente o hidrogénio no núcleo central, esta camada passa a ser a única fonte de produção de energia na estrela.

Uma vez iniciada a queima de hidrogénio na camada, a estrela desloca-se rapidamente no diagrama HR, tornando-se um pouco mais luminosa e mais fria. A queda de temperatura na superfície deve-se a uma pequena expansão das regiões externas, o que aumenta a área da superfície. Este aumento na área leva a um pequeno aumento na luminosidade total.

Quando cessa totalmente a fusão nuclear na região central, há nova diminuição da temperatura, agora acompanhada não de uma contracção, mas de um colapso. Neste processo, a energia potencial gravitacional é convertida em energia térmica, que serve para aumentar a camada envolvente onde se queima o hidrogénio.

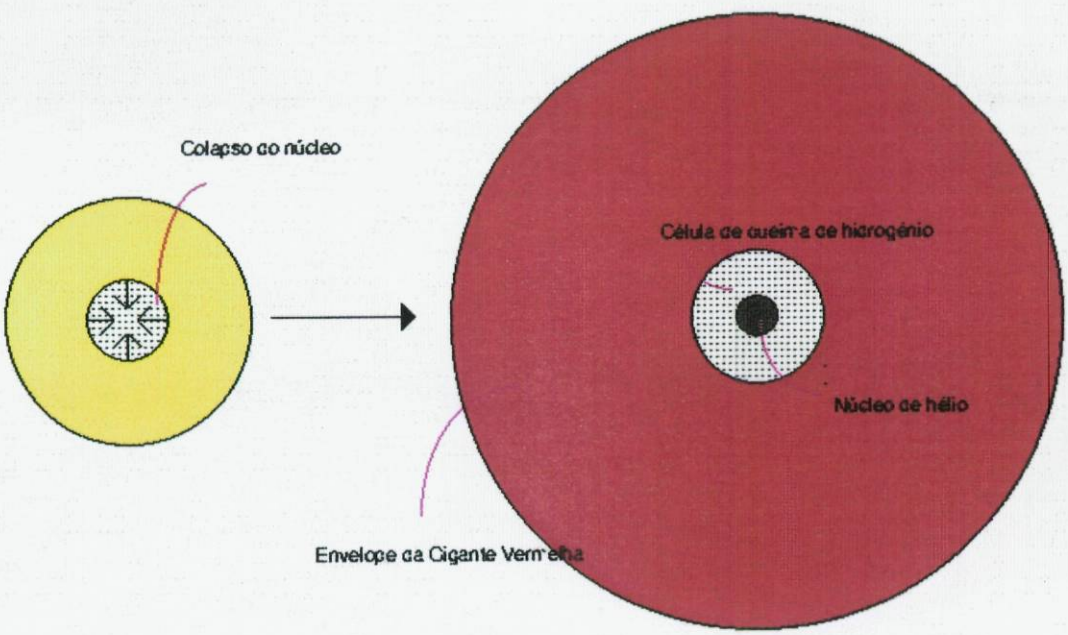


Figura 9.30– Célula de queima do hidrogénio

Agora, a camada ao redor da região central é muito maior, libertando muito mais energia via fusão nuclear do que antes. Portanto a luminosidade da estrela aumenta muito levando à expansão das suas camadas mais externas, com consequente aumento da área da sua superfície e diminuição da sua temperatura efectiva. A estrela é agora uma *gigante vermelha*, cujo espectro é típico das classes espectrais K e M. A figura abaixo mostra, para diferentes

massas, o deslocamento no diagrama HR de estrelas que saem da sequência principal para se tornarem gigantes vermelhas.

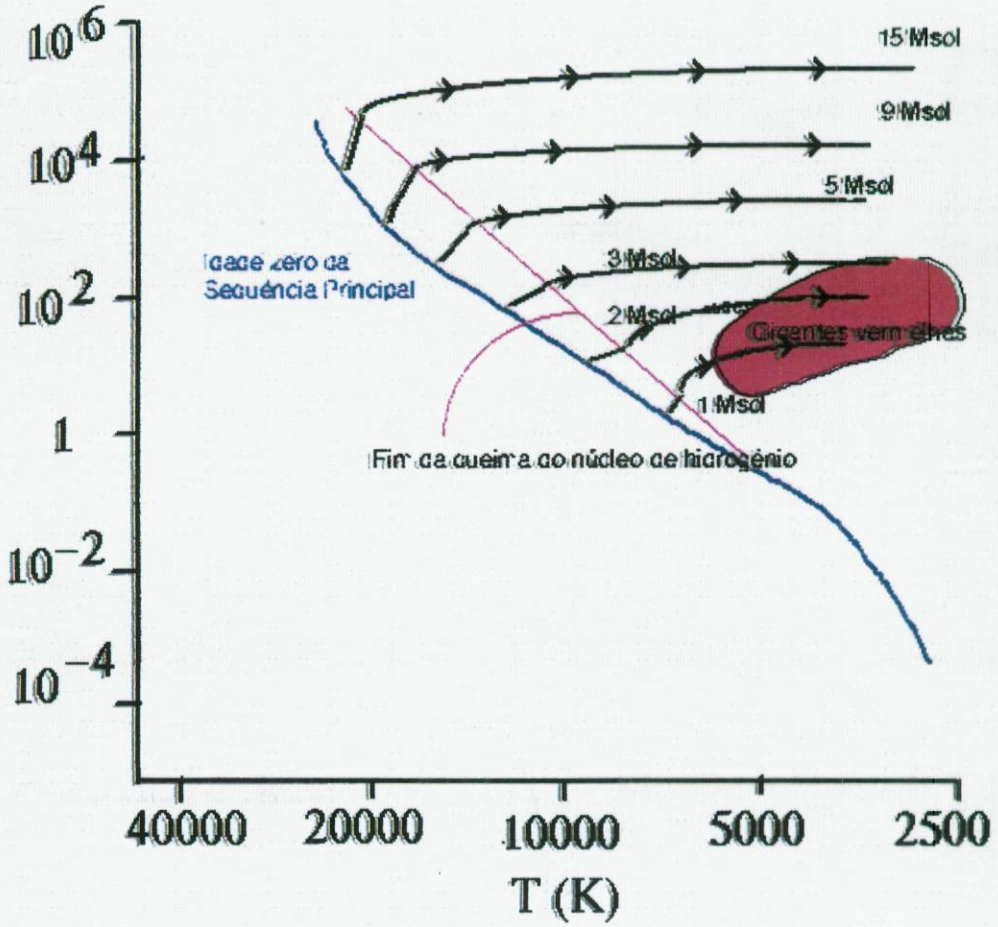


Figura 9.31 – Saídas da sequência principal no diagrama HR de estrelas para se tornarem gigantes vermelhas. Adaptada de http://www.iagusp.usp.br/~jane/aga215/index.html

Todo o processo leva alguns milhões de anos, mas, no final, a estrela torna-se uma gigante ou uma *supergigante* vermelha, dependendo da sua massa. Da sua massa depende também a duração deste processo de evolução da sequência principal para uma gigante ou supergigante. Estrelas massivas e quentes, do tipo espectral O, evoluem muito rapidamente e tornam-se supergigantes. Estrelas mais frias e menos massivas, de tipo G, por exemplo, levam uns 10 biliões de anos e tornam-se gigantes.

É de salientar ainda que não vemos estrelas evoluídas com menos do que 0.8 da massa solar. Isso deve-se ao facto de que o tempo de vida dessas estrelas na sequência principal é maior do que a idade do Universo, de forma que elas ainda não tiveram tempo de chegar a gigantes, mesmo as mais velhas. Na verdade,

uma forma de estimar um limite inferior para a idade do Universo é estimar a idade das gigantes vermelhas mais velhas que podemos observar.

9.4.5 Evolução de Gigantes Vermelhas

A evolução de uma estrela após a fase de gigante (ou supergigante) vermelha depende da sua massa. Em estrelas de massa maior do que 1 massa solar, a camada envelope de queima de hidrogénio move-se de dentro para fora, deixando para trás uma crescente região central rica em hélio. Esta última torna-se mais massiva e compacta, a sua temperatura e pressão interna aumentam continuamente.

A densidade da região central aumenta até o ponto em que os electrões livres no seu interior se tornam degenerados. A pressão dos electrões degenerados é suficiente para conter a gravidade e a contracção cessa. É como se o centro da estrela começasse a se comportar mais como um líquido incompressível do que como um gás.

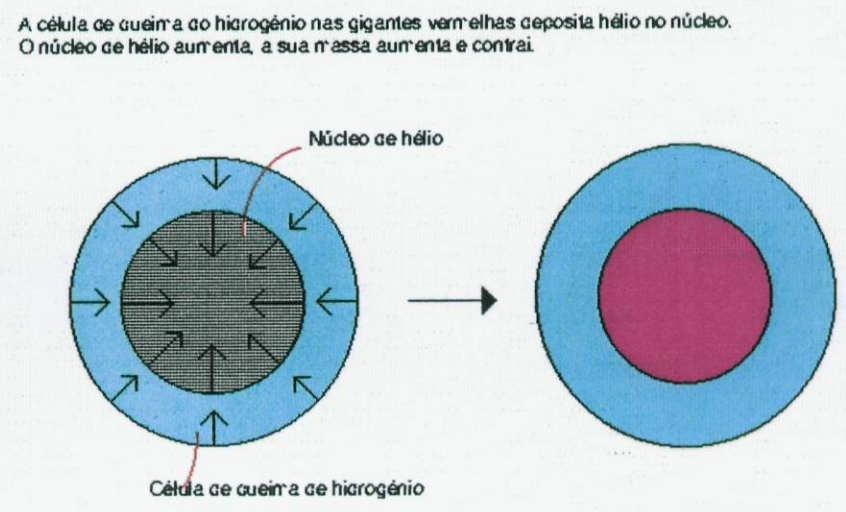


Figura 9.32- Degenerescência do núcleo
Adaptada de http://www.iagusp.usp.br/~jane/aga215/index.html

Enquanto isso, a camada rica em hidrogénio continua a produzir mais energia e a depositar mais hélio, produzido pelas reacções de fusão. Agora o núcleo central aumenta de temperatura mas não se expande nem se contrai.

Eventualmente a temperatura central atinge os 100 milhões de graus necessários para que possam ocorrer reacções de fusão de hélio em carbono, no processo chamado de *processo de triplo alfa*.

A energia libertada por este novo tipo de reacção nuclear aumenta rapidamente a temperatura no centro da estrela. Em circunstâncias normais, este aquecimento levaria a um aumento da pressão, fazendo com que o núcleo central se expandisse e arrefecesse até uma configuração de equilíbrio. Mas devido à degenerescência dos electrões, a temperatura sobe, mas a região central não se expande (o equilíbrio neste caso não é devido à pressão de origem térmica, mas sim à dos electrões degenerados). O aumento de temperatura significa o aumento da produção de energia pelo processo triplo alfa, o que só faz aumentar ainda mais a temperatura, e assim por diante.
Este processo do tipo "bola de neve" só termina quando a temperatura é tão alta que a libertação de energia pela fusão do hélio se torna explosiva. Isso ocorre a ~300 milhões de graus. A este evento chamamos de *surto de hélio*. Dura apenas alguns minutos, mas durante o surto de hélio a luminosidade que se liberta nas regiões centrais é mais do que 100 vezes a luminosidade de toda a Galáxia! Toda esta energia, contudo, não chega à superfície da estrela, sendo usada para remover a degenerescência dos electrões no centro da estrela.
Para estrelas com mais de duas massas solares, o processo de fusão do hélio no centro começa antes de que ocorra a degenerescência dos electrões. Assim sendo, não há surto de hélio, mas apenas uma transição mais suave de uma região central dormente para uma em que hélio é convertido em carbono.

9.4.6 Estrelas do Ramo Horizontal

Uma vez iniciada a queima do hélio no centro da estrela (seja abrupta ou suavemente), a estrela passa a ter duas fontes de energia: fusão de hidrogénio em hélio numa camada envolvente e fusão do hélio em carbono na região central. Nesta última região, uma vez que haja uma quantidade substancial de carbono, este elemento começa a combinar se com hélio para formar núcleos de oxigénio. O núcleo central torna-se então rico em núcleos de carbono e oxigénio. A produção de energia por dois processos aumenta a temperatura externa da

estrela e ela passa para uma posição no diagrama HR a que chamamos de *ramo horizontal.*

Estrelas com massa igual ou maior do que a solar tornam-se menores e mais quentes, mantendo aproximadamente constante a sua luminosidade. Elas migram para o ramo horizontal movendo-se horizontalmente pelo diagrama HR. Estrelas de massa aproximadamente solar migram para uma posição correspondente a 10 luminosidades solares; estrelas de maior massa ocupam um ramo horizontal mais alto: 200 luminosidades solares. À medida que evoluem, as estrelas do ramo horizontal atravessam a faixa de instabilidade. Por um período relativamente curto, portanto, as estrelas de alta massa tornam-se *variáveis Cefeides* e as de menor massa tornam- se variáveis do tipo *RR Lyrae.*

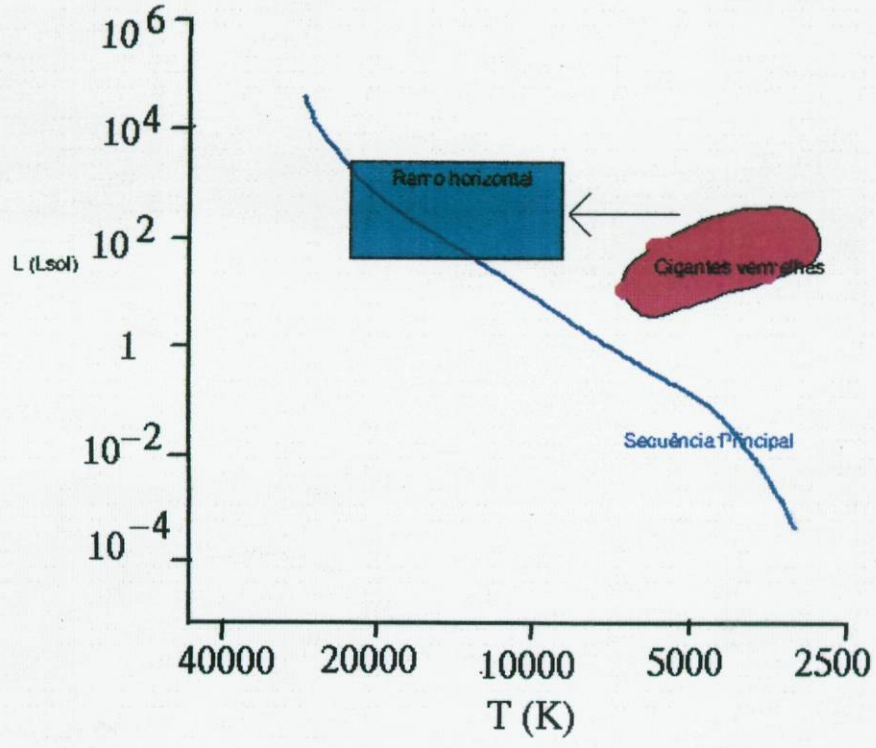


Figura 9.33- Evolução no diagrama HR para o ramo horizontal
Adaptada de http://www.iagusp.usp.br/~jane/aga215/index.html

9.4.7 Estrelas do Ramo Assimptótico de Gigantes:

Depois de alguns milhões de anos no ramo horizontal, o hélio no centro de uma estrela também se esgota; a sua região central é agora maioritariamente composta por núcleos de carbono e de oxigénio. A região central então contrai-se e aquece, formando uma camada envolvente (que anteriormente tinha

temperatura menor do 100 milhões de graus) onde o hélio é transformado em carbono e sobre a qual se situa a camada de queima de hidrogénio.

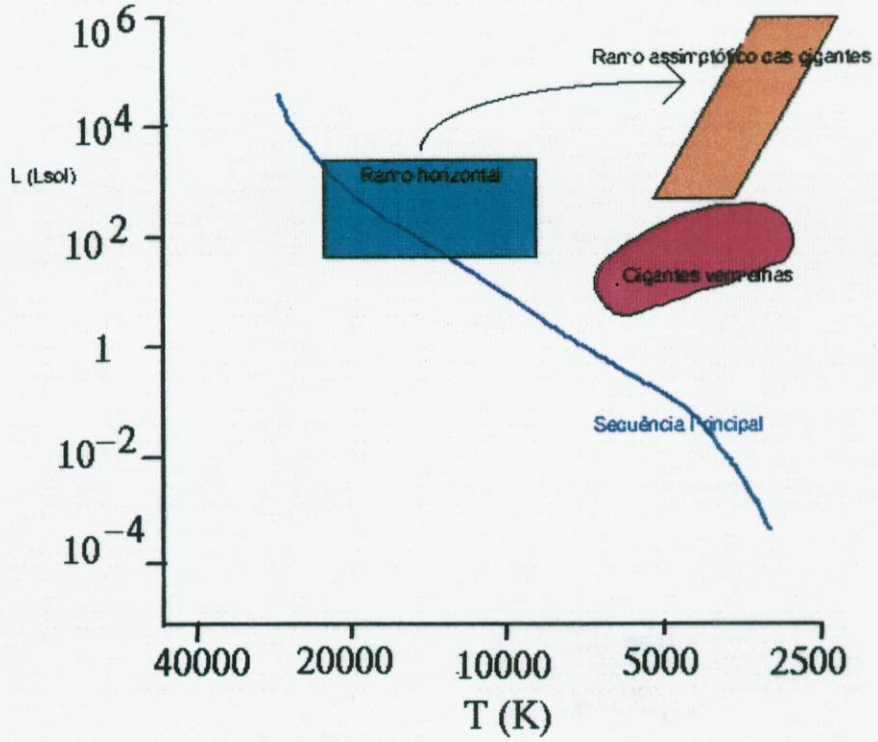
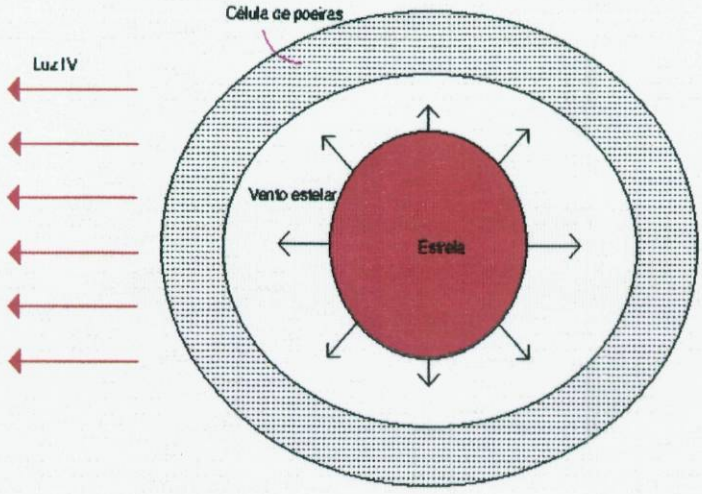


Figura 9.34– Mudanças no diagrama HR para o ramo assimptótico das gigantes
Retirada de http://www.iagusp.usp.br/~jane/aga215/index.html

Inicialmente, a maior parte da energia é produzida na camada rica em hidrogénio, sendo a camada de hélio relativamente pequena. Contudo, à medida em que a camada de hidrogénio deposita mais hélio, aumenta a produção de energia via fusão de hélio, levando a um evento explosivo chamado de *pulso térmico*.

O pulso térmico leva ao aumento da região central, rica em carbono e oxigénio. A estrela nesta fase aumenta de tamanho e luminosidade; no diagrama HR sobe pelo ramo assimptótico. Ao fazê-lo, a estrela começa a produzir um vento de partículas carregadas que se afastam dela. Há portanto perda de massa pela estrela, que se desfaz de grande parte das suas regiões mais externas. É neste vento que as partículas de poeira existentes no *meio interestelar* se formam .

Nesta fase, uma camada de poeira que circunda a estrela bloqueia a sua luz visível, fazendo com que, apesar de ser 10 mil vezes mais luminosa do que o Sol, ela seja apenas visível no infravermelho.



Uma estrela no AGB (no ramo assimptótico das gigantes) está no interior de uma célula de poeira produzida pelo vento estelar. A poeira bloqueia a passagem da luz visível, fazendo com que a estrela seja uma fonte emissora no IV (infra vermelho).

Figura 9.35 Uma estrela no ramo assimptótico encontra-se no interior de uma célula de poeira

Os diagramas abaixo resumem os diferentes estágios por que passa a região central de uma estrela ao longo da sua evolução, desde a sequência principal até o ramo assimptótico. Ele é válido para estrelas de massa solar ou maior.

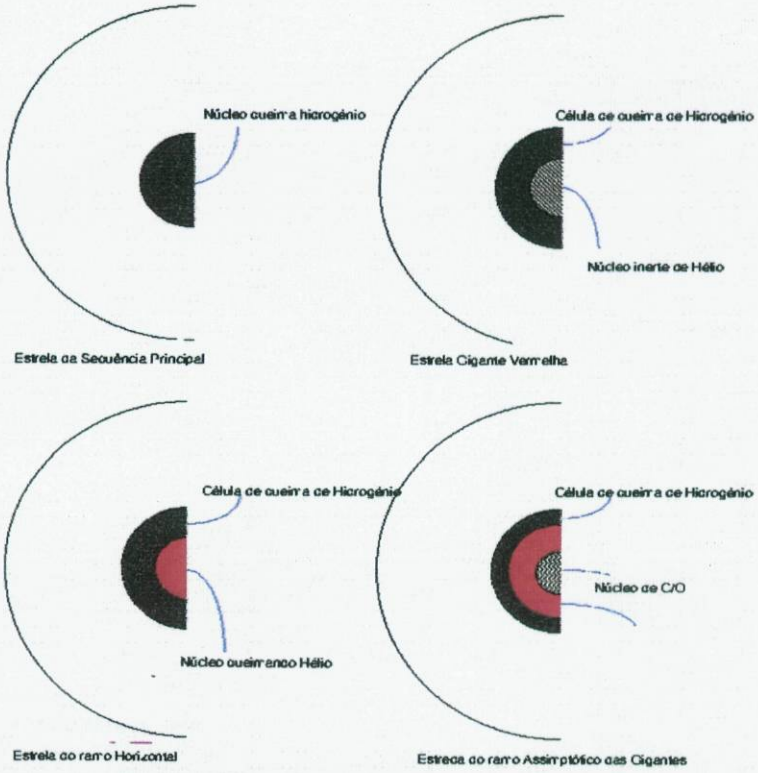


Figura 9.36- Diferentes estágios por que passa a região central de uma estrela ao longo da sua evoluçãoRetirada de http://www.iagusp.usp.br/~jane/aga215/index.html

O vento estelar leva à perda de massa para estrelas no ramo assimtótico. A perda é da ordem de 10^{-4} massa solar por ano, o que leva à perda da maior parte da massa da estrela numa escala de tempo de uns 10 mil anos. O que sobra é basicamente a região central, quente, rica em carbono e oxigénio e rodeada por uma nebulosa planetária. Se a estrela tem mais do que 8 massas solares pode continuar com as reacções de fusão nuclear, convertendo núcleos de carbono e oxigénio noutros mais pesados, como o néon, e este depois é transformado em magnésio, silício, até o ferro.

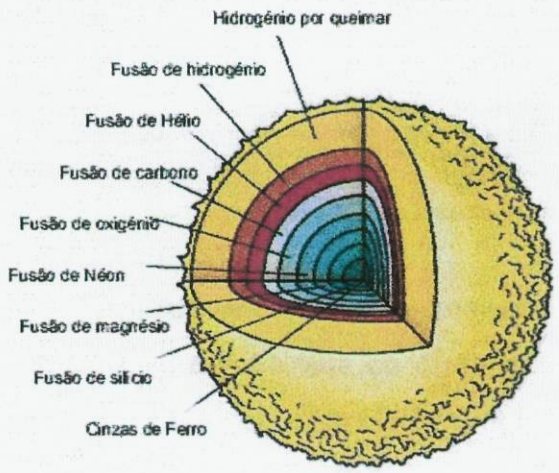


Figura 9.37 Estrutura casca de cebola
Adaptada de http://www.iagusp.usp.br/~jane/aga215/index.html

O núcleo de ferro comporta-se de maneira diferente dos elementos mais leves; é um núcleo estável e resistente à fusão nuclear. A temperatura de uma região central rica em ferro pode chegar a 3 bilhões de graus. Ao atingir uma massa crítica, um núcleo de ferro colapsa violentamente, iniciando um processo explosivo a que chamamos de *supernova*.

9.4.7 Nebulosa Planetária:

À medida que cresce e se torna mais luminosa, uma estrela no ramo assimptótico das gigantes também perde mais massa. Em estrelas com 8 massas solares ou menos, um forte vento estelar desenvolve-se, expelindo as camadas mais externas da estrela e expondo assim a região central quente, com núcleos de carbono e oxigénio e electrões degenerados. A estrela move-se então para a esquerda no diagrama HR, pois a parte exposta é mais quente do que o envelope expelido.

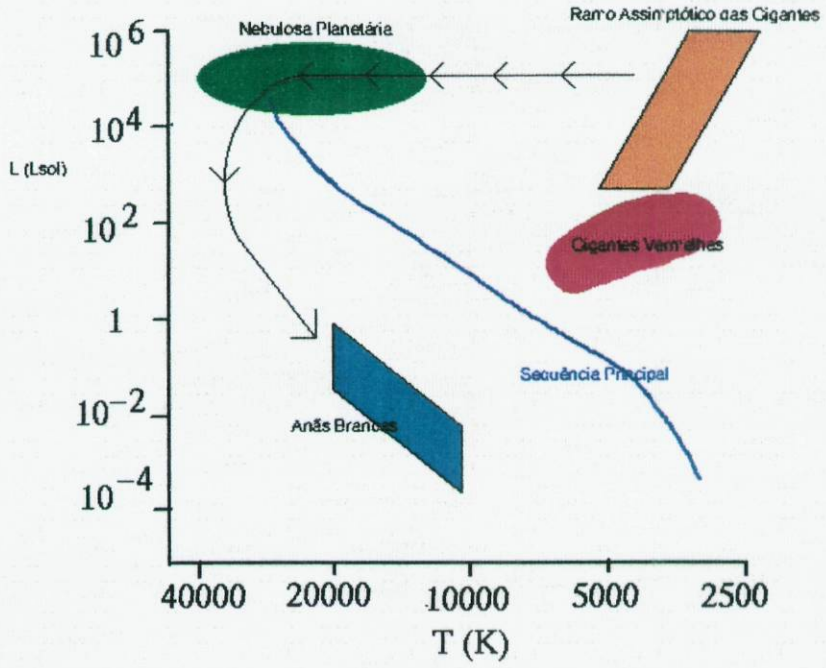


Figura 9.38- Evolução de nebulosa planetária
Retirada de http://www.iagusp.usp.br/~jane/aga215/index.html

Em apenas uns mil anos, a temperatura da estrela sobe para ~30000 K. A esta temperatura, a emissão de luz ultra-violeta é alta. Esta radiação é suficientemente energética para ionizar a camada de hidrogénio que foi expelida pelo vento estelar durante a fase de gigante assimptótica. A camada de hidrogénio começa então a irradiar, transformando-se numa nebulosa planetária. Este nome deve-se à forma da nuvem de hidrogénio ionizado que circunda a estrela, que em geral é esférica e lembra vagamente a forma de um planeta. Ao centro da nebulosa resta então, apenas a região central remanescente.

Estrelas com massa superior a umas 20 ou 25 massas solares são capazes de continuar com o processo de fusão nuclear no seu núcleo central até que este seja de Ferro. Aí explodem como supernovas ao final da sua passagem pelo ramo assimptótico das gigantes.

9.4.8 Anãs Brancas

O estudo sobre as anãs brancas iniciou-se em 1850 com a descoberta da estrela secundária de Sirius, chamada Sirius B. Observou-se ser uma estrela 10000 vezes menos luminosa do que Sirius A, mas com uma massa de 0.98 massa solar. A sua temperatura, sendo da ordem de 10 mil K, o seu raio deveria ser

extremamente pequeno. Como estrelas com essa temperatura externa são brancas, esse tipo de estrela passou a ser chamado de *anã branca.*

Anãs brancas são, portanto, de massa comparável à do Sol, mas de tamanho apenas ligeiramente maior do que o da Terra.

Constatou-se desde logo, que o material no interior de uma anã branca era muito denso para se comportar como um gás ideal. Ao invés disso, o gás estava degenerado. Em estrelas normais, um aumento da massa levaria ao aumento do tamanho, aumentando portanto o seu diâmetro. Para anãs brancas, todavia, o contrário é verdadeiro; as de massa maior são menores. Portanto, há um limite superior para a massa de uma anã branca, para o qual o seu raio tende para zero. Este limite é chamado de *limite de Chandrasekhar.* Abaixo vemos a relação entre a massa e o raio das anãs brancas.

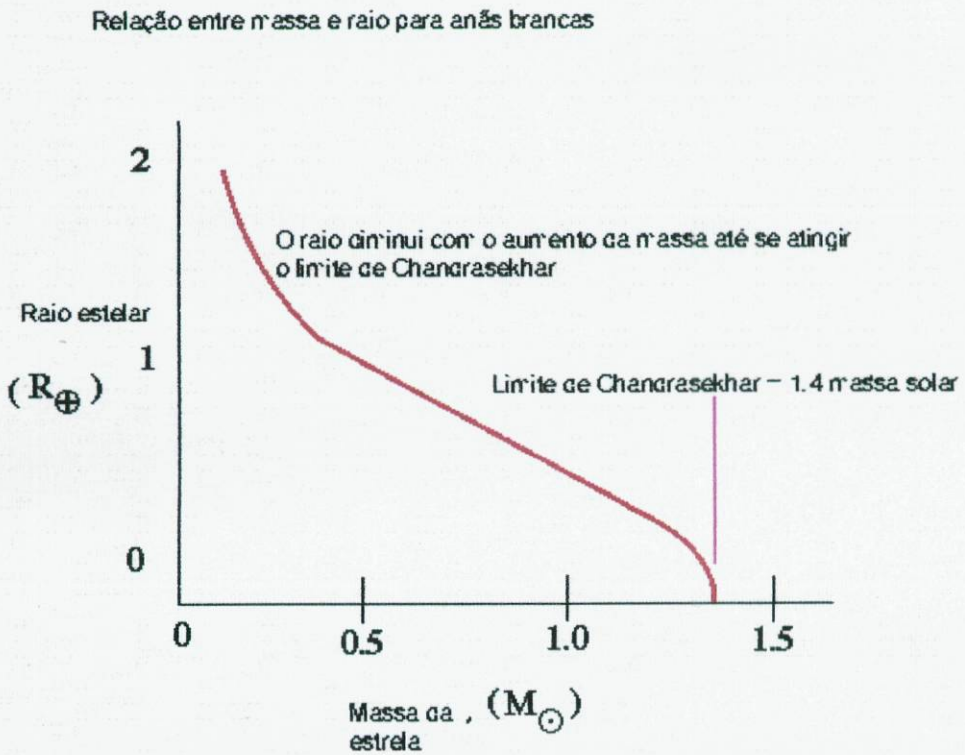


Figura 9.39. Relação entre o raio e a massa para anãs brancas
Retirada de http://www.iagusp.usp.br/~jane/aga215/index.html

O tamanho de uma estrela é determinado pelo equilíbrio entre a pressão interna do gás, que tende a fazer a estrela expandir-se, e a pressão gravitacional, que tende a fazer a estrela colapsar. Num gás degenerado, como são os electrões no interior de uma anã branca, um aumento na densidade aumenta mais a pressão gravitacional do que a pressão interna do gás. Por conseguinte, um acréscimo

de massa a uma anã branca originalmente em equilíbrio faz com que a pressão gravitacional prevaleça sobre a interna, levando a uma contracção da estrela.
Essa relação massa-raio de uma anã branca implica que há um limite máximo para a massa de uma estrela deste tipo. O limite de Chandrasekhar é da ordem de 1.4 massa solar (o Sol, portanto, irá certamente tornar-se anã branca no final da sua existência). Além deste limite, ou a estrela perde massa durante os estágios de gigante assimptótica e nebulosa planetária e termina com menos de 1.4 massa solar, ou a pressão dos seus electrões degenerados não será suficiente para contrabalançar a gravidade. Noutras palavras, não existe equilíbrio possível para uma estrela com massa maior que este limite dentro do contexto de uma anã branca. Uma estrela dessas terminará então noutro tipo de objecto: ou uma estrela de neutrões ou um buraco negro.

9.4.7.1 A Evolução de uma anã branca

Anãs brancas são bastante comuns, sendo encontradas em sistemas binários e em aglomerados. Como são remanescentes de gerações de estrelas formadas no passado, o seu número cresce dentro da Galáxia à medida que passa o tempo. Mas por serem muito pouco luminosas, é muito difícil detectá-las, excepto as mais próximas.
Uma anã branca é uma estrela que já esgotou o seu combustível nuclear. Não possui, portanto, uma fonte de energia nuclear que a mantenha luminosa por muito tempo. Entretanto, uma anã branca, por ser originalmente a região central de uma estrela, é inicialmente um objecto bastante quente (ou seja, aquilo que "sobrou" depois do estágio de gigante assimptótica). Em consequência, ela mantém-se a irradiar luz pela conversão da sua energia interna em radiação. Uma estrela normal também o faz, mas tem a sua energia térmica reposta pelas reacções nucleares. No caso de uma anã branca, a inexistência de um processo de reposição da sua energia interna implica que a estrela lentamente arrefece. Estrelas de maior massa arrefecem mais rapidamente do que as de menor massa.

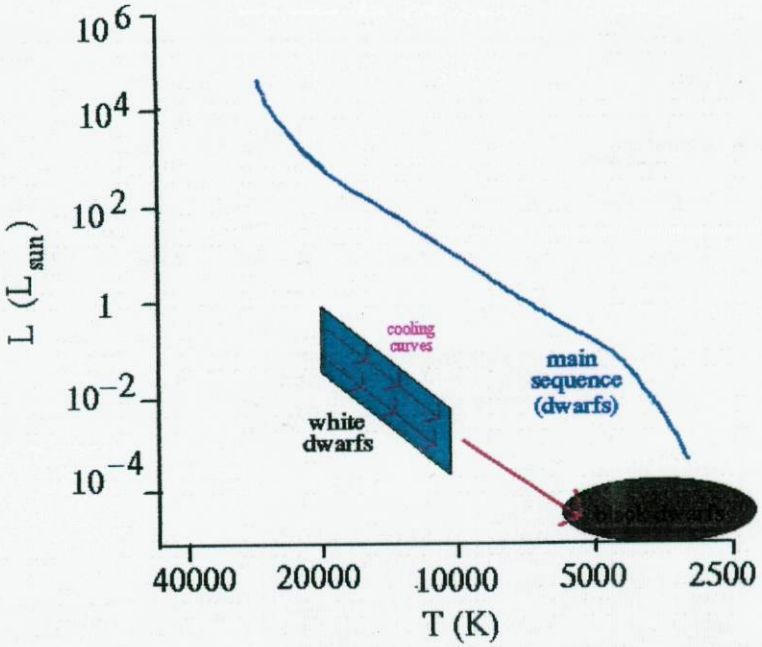


Figura 9.40 - Relação entre luminosidade e o tempo para uma anã branca – curva de arrefecimento. Retirada de http://www.iagusp.usp.br/~jane/aga215/index.html

O arrefecimento por emissão de luz é uma das formas pelas quais uma anã branca arrefece. A outra envolve a emissão de neutrinos. Se a temperatura é da ordem de uns 30 milhões de graus, os raios gama podem passar próximos a electrões e produzir um par de neutrinos, Estas partículas, cuja massa é nula ou muito baixa, interagem muito pouco com a matéria e escapam livremente da estrela, carregando consigo energia.

Por outro lado, à medida que a anã branca arrefece, os iões no seu interior podem formar uma estrutura ordenada, libertando energia. Isso ocorre quando a temperatura em queda atinge um determinado valor crítico. A este processo denominamos de *cristalização,* e a energia libertada aumenta o tempo arrefecimento de uma anã branca em torno de 30%.

O processo de arrefecimento nas anãs brancas é lento. Após cerca de 1 bilhão de anos, a luminosidade de uma anã branca reduz-se a um valor da ordem de 0.001 do valor solar. Mas o processo não para aí e a anã branca eventualmente irradia toda a sua energia interna, tornando-se um objecto sólido, cristalizado e frio: uma anã preta.

9.4.8 Sequência da vida de uma estrela - síntese

O esquema seguinte sintetiza toda a sequência da vida de uma estrela. No início, uma gigantesca nuvem de gás interestelar começa a colapsar-se até se formar a proto-estrela. Enquanto esta nuvem vai contraindo forma-se o núcleo e iniciam-se as reacções nucleares. A massa dessa nuvem e a sua luminosidade determina o tipo de estrela. Depois de consumir o seu combustível a estrela entra em colapso.

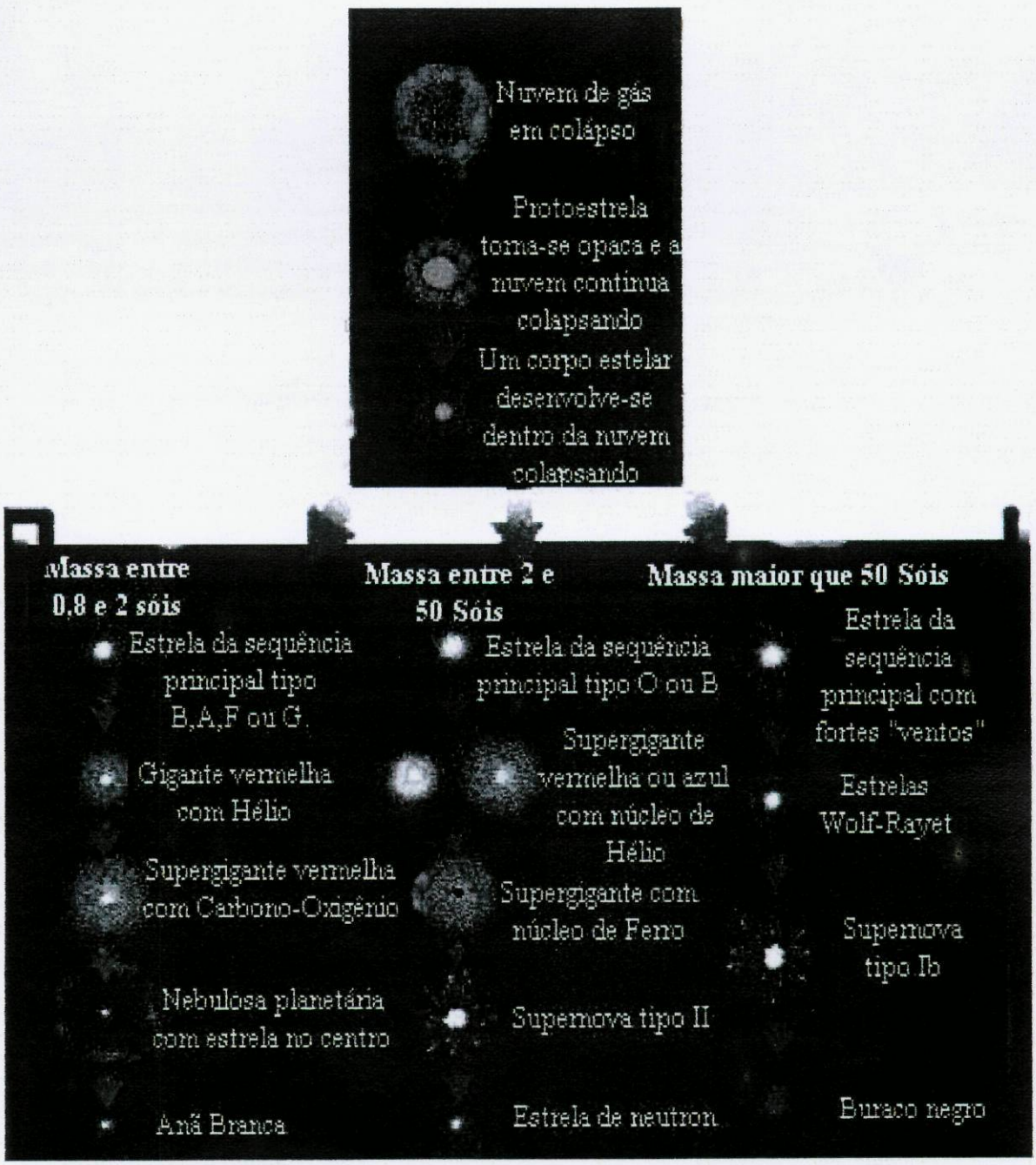


Figura 9.41 – Esquema síntese da vida de uma estrela
Retirada de http://www.iagusp.usp.br/~jane/aga215/index.html

ANEXOS

Anexo 1

Relação entre as várias unidades programáticas de diferentes disciplinas, o ano em que são leccionadas.

3º Ano de escolaridade - Estudo do meio

Tópicos/objectivos

* Os astros - verificar as posições do sol ao longo do dia.

4º Ano de escolaridade - Estudo do meio

Tópicos/objectivos

* Distinguir estrelas de planetas.
* Observar no modelo o Sistema Solar.
* Constatar a forma da Terra através de fotografia.
* Observar e representar aspectos da Lua nas diferentes fases.

7º Ano de escolaridade - Ciências Naturais

Tópicos/objectivos

* A Terra no espaço.
* Compreender que a Terra pertence a um sistema planetário dependente do Sol.
* Identificar o Sistema Solar como uma parte do Universo.

8º Ano de escolaridade - Ciências Físico Químicas

Tópicos/objectivos

Unidade I - Nós e o Universo

* Explicar a sucessão do dias e das noites, as fases da Lua , os eclipses, a variação do comprimento da sombra de uma vara durante o dia, com base na descrição e representação do movimento dos planetas no Sistema Solar.
* Distinguir corpos luminosos de corpos iluminados.
* Situar a Terra e o Sistema Solar no Universo.
* Relacionar escalas de distância no Universo, usando unidades de comprimento adequadas.
* Calcular uma distância, usando o método de triangulação e identificar este método como um dos processos utilizados para medir distâncias entre a Terra e astros próximos.
* Reconhecer que os espectros constituem um dos processos importantes de estudo e identificação das estrelas.

* Identificar a força gravitacional, responsável pelo movimento de um planeta à volta do Sol ou de um planeta à volta de outro, como uma força atractiva em direcção ao centro dos corpos e que a sua intensidade aumenta com a massa e varia com a distância de acordo com a expressão matemática $F = Gx\frac{Mm}{d^2}$

* Identificar a força gravítica, responsável pela queda dos corpos como um caso particular da força de atracção gravitacional.

* Medir o peso de um corpo com um dinamómetro.

* Medir a massa de um corpo usando uma balança de dois pratos.

* Comparar a intensidade das forças gravíticas exercidas por diferentes planetas sobre um mesmo corpo à sua superfície.

* Comparar diferentes características dos planetas do Sistema solar (massa, diâmetro, distância média ao Sol, constituição, existência de satélites, temperatura à superfície, atmosfera, períodos de rotação e translação, etc).

* Identificar e reconhecer a existência do campo magnético terrestre e identificar interacções magnéticas.

* Orientar-se com uma bússola.

* Orientar-se pelo Sol durante o dia e pelas estrelas durante a noite.

* Explicar o lançamento de foguetões, usando uma abordagem qualitativa do princípio da conservação do momento linear e da lei acção-reacção.

* Identificar e descrever aplicações de satélites artificiais (telecomunicações, estações meteorológicas, laboratórios espaciais).

* Usar dados sobre o Sistema Solar, estrelas ou Universo em geral, para discutir sobre exploração espacial e vida no espaço.

Unidade III e IV - O som e a audição / A luz e a visão

(Alguns objectivos que podem ser explorados nestas duas unidades temáticas)

* As estrelas como objectos luminosos.

* Propagação da luz das estrelas.

* Refracção da luz e suas consequências na Astronomia.
* O uso de espelhos (telescópios).
* Espectro electromagnético.
* O som nas estrelas
* O som no espaço (astronautas e suas comunicações)
* Radiação solar e a sua absorção pela atmosfera terrestre.

10º Ano de escolaridade – Ciências da Terra e da Vida

Unidades:

* Planeta Terra – contributos para o seu conhecimento
* Astrogeologia
* Dados geofísicos – fluxo térmico

11º Ano de escolaridade – Ciências Físico – Químicas

Unidade II (Componente de Física): Ondas

* Ondas e suas propriedades
* A luz e fenómenos associados

Unidade I (Componente de Química): Investigando a estrutura dos átomos

* A matéria pode absorver e emitir luz
* Energia e tamanho dos átomos

12º Ano de escolaridade - Física

Tópicos/objectivos

Unidade I – Força e movimento

Movimento relativo

Dinâmica de um sistema de partículas materiais

Unidade II - Interacções e campos

* Interacção gravitacional.
*Evolução histórica das teorias sobre os movimentos dos corpos do Sistema Solar.
* Leis de Kepler
* Lei da gravitação universal.
* Dinâmica do Sistema Solar.
* Constante de gravitação.

* A causa das marés.
* Satélites geostacionários.
* Peso e força gravítica.
* Massa gravítica e massa inércial.
* Campo gravitacional
* Conceito de campo.
* Vector campo gravitacional.
* Linhas de campo.

Unidade III – Fenómenos que envolvem campos magnéticos variaveis
* Ondas electromagneticas

Química – Estrutura de átomos e moléculas
* Suporte experimental para a estrutura electrónica de átomos e moléculas
* Métodos espectroscópicos

Geologia – Origem da Terra

Anexo 2

Lista alfabética das constelações, em *Latim* e Português

Andromeda, Andrômeda (mit.)
Antlia, Bomba de Ar
Apus, Ave do Paraíso
Aquarius, Aquário
Aquila, Águia
Ara, Altar
Aries, Áries (Carneiro)
Auriga, Cocheiro
Boötes, Pastor
Caelum, Buril de Escultor
Camelopardalis, Girafa
Cancer, Câncer (Caranguejo)
Canes Venatici, Cães de Caça
Canis Major, Cão Maior
Canis Minor, Cão Menor
Capricornus, Capricórnio (Cabra)
Carina, Quilha (do Navio)
Cassiopeia, Cassiopéia (mit.)
Centaurus, Centauro
Cepheus, Cefeu (mit.)
Cetus, Baleia
Chamaeleon, Camaleão
Circinus, Compasso
Columba, Pomba
Coma Berenices, Cabeleira
Corona Austrina, Coroa Austral
Corona Borealis, Coroa Boreal
Corvus, Corvo
Crater, Taça
Crux, Cruzeiro do Sul
Cygnus, Cisne
Delphinus, Delfim
Dorado, Dourado (Peixe)
Draco, Dragão
Equuleus, Cabeça de Cavalo
Eridanus, Eridano
Fornax, Forno
Gemini, Gêmeos
Grus, Grou
Hercules, Hércules
Horologium, Relógio
Hydra, Cobra Fêmea
Hydrus, Cobra macho
Indus, Índio
Lacerta, Lagarto
Leo, Leão
Leo Minor, Leão Menor
Lepus, Lebre

Libra, Libra (Balança)
Lupus, Lobo
Lynx, Lince
Lyra, Lira
Mensa, Montanha da Mesa
Microscopium, Microscópio
Monoceros, Unicórnio
Musca, Mosca
Normai, Régua
Octans, Octante
Ophiuchus, Ofiúco (Caçador de Serpentes)
Orion, Órion (Caçador)
Pavo, Pavão
Pegasus, Pégaso (Cavalo Alado)
Perseus, Perseu (mit.)
Phoenix, Fênix
Pictor, Cavalete do Pintor
Pisces, Peixes
Piscis Austrinus, Peixe Austral
Puppis, Popa (do Navio)
Pyxis, Bússola
Reticulum, Retículo
Sagitta, Flecha
Sagittarius, Sagitário
Scorpius, Escorpião
Sculptor, Escultor
Scutum, Escudo
Serpens, Serpente
Sextans, Sextante
Taurus, Touro
Telescopium, Telescópio
Triangulum, Triângulo
Triangulum Australe, Triângulo Austral
Tucana, Tucano
Ursa Major, Ursa maior
Ursa Minor, Ursa Menor
Vela, Vela (do Navio)
Virgo, Virgem
Volans, Peixe Voador
Vulpecula, Raposa

Essas constelações foram definidas por:
Claudius Ptolomaeus, no *Almagesto* em cerca de 150 d.C.;
Johann Bayer (1572-1625), astrônomo alemão, no *Uranometria* em 1603;
Johannes Hevelius (1611-1689), astrônomo alemão-polonês, e
Nicolas Louis de Lacaille (1713-1762), astrônomo francês, nos *Memórias* e *Coelum Stelliferum* em 1752 e 1763.

Anexo 2

Lista alfabética das constelações, em *Latim* e Português

Andromeda, Andrômeda (mit.)
Antlia, Bomba de Ar
Apus, Ave do Paraíso
Aquarius, Aquário
Aquila, Águia
Ara, Altar
Aries, Áries (Carneiro)
Auriga, Cocheiro
Boötes, Pastor
Caelum, Buril de Escultor
Camelopardalis, Girafa
Cancer, Câncer (Caranguejo)
Canes Venatici, Cães de Caça
Canis Major, Cão Maior
Canis Minor, Cão Menor
Capricornus, Capricórnio (Cabra)
Carina, Quilha (do Navio)
Cassiopeia, Cassiopéia (mit.)
Centaurus, Centauro
Cepheus, Cefeu (mit.)
Cetus, Baleia
Chamaeleon, Camaleão
Circinus, Compasso
Columba, Pomba
Coma Berenices, Cabeleira
Corona Austrina, Coroa Austral
Corona Borealis, Coroa Boreal
Corvus, Corvo
Crater, Taça
Crux, Cruzeiro do Sul
Cygnus, Cisne
Delphinus, Delfim
Dorado, Dourado (Peixe)
Draco, Dragão
Equuleus, Cabeça de Cavalo
Eridanus, Eridano
Fornax, Forno
Gemini, Gêmeos
Grus, Grou
Hercules, Hércules
Horologium, Relógio
Hydra, Cobra Fêmea
Hydrus, Cobra macho
Indus, Índio
Lacerta, Lagarto
Leo, Leão
Leo Minor, Leão Menor
Lepus, Lebre

Libra, Libra (Balança)
Lupus, Lobo
Lynx, Lince
Lyra, Lira
Mensa, Montanha da Mesa
Microscopium, Microscópio
Monoceros, Unicórnio
Musca, Mosca
Normai, Régua
Octans, Octante
Ophiuchus, Ofiúco (Caçador de Serpentes)
Orion, Órion (Caçador)
Pavo, Pavão
Pegasus, Pégaso (Cavalo Alado)
Perseus, Perseu (mit.)
Phoenix, Fênix
Pictor, Cavalete do Pintor
Pisces, Peixes
Piscis Austrinus, Peixe Austral
Puppis, Popa (do Navio)
Pyxis, Bússola
Reticulum, Retículo
Sagitta, Flecha
Sagittarius, Sagitário
Scorpius, Escorpião
Sculptor, Escultor
Scutum, Escudo
Serpens, Serpente
Sextans, Sextante
Taurus, Touro
Telescopium, Telescópio
Triangulum, Triângulo
Triangulum Australe, Triângulo Austral
Tucana, Tucano
Ursa Major, Ursa maior
Ursa Minor, Ursa Menor
Vela, Vela (do Navio)
Virgo, Virgem
Volans, Peixe Voador
Vulpecula, Raposa

Essas constelações foram definidas por:
Claudius Ptolomaeus, no *Almagesto* em cerca de 150 d.C.;
Johann Bayer (1572-1625), astrônomo alemão, no *Uranometria* em 1603;
Johannes Hevelius (1611-1689), astrônomo alemão-polonês, e
Nicolas Louis de Lacaille (1713-1762), astrônomo francês, nos *Memórias* e *Coelum Stelliferum* em 1752 e 1763.

BIBLIOGRAFIA

[1] Alonso, M., Somos muy Conservadores en la Enseñanza de la Física?, Lição plenaria presentada na XXVI Reunión Bienal de la Real Sociedad Española de Física, Las Palmas de Gran Canaria, Set 1997

[2] Astro, Terra e Espaço - Actividades para as escolas do 1º e 2º ciclo

[3] Böhm-vitense, Erika, Introduction to stellar astrophysics – vol 1- basic stellar observations and data, Cambridge University Press, 1991

[4] Böhm-vitense, Erika, Introduction to stellar astrophysics – vol 2- stellar atmospheres, Cambridge University Press, 1990

[5] Böhm-vitense, Erika, Introduction to stellar astrophysics – vol 3- stellar structure and evolution, Cambridge University Press, 1992

[6] Brodin, G., The Role of the Laboratory in the Education of Industrial Physicists and Engineers, 1978

[7] Clarke, D., Astronomy – structure of the universe, 3rd edition, Adam Hilger, Bristol and New York, 1989

[8] Clayton, Donald D., Principles of stellar evolution and nucleosynthesis, Macgraw-Hill, 1983

[9] Colecção de Astronomia da Orbis Fabri, 1994

[10] Cooke, C., An Introduction to Experimental Physics, UCL Press, London, 1996

[11] Costa, Vitor Manuel Moreira, T Tauri Stars Pictured at Ultraviolet and X-rays, Departamento de Matemática Aplicada, FCUP, 2000

[12] Cram, Lawrence E., FGK Stars and T Tauri Stars, Nasa, 1989

[13] Driver, R., The Pupil as Scientist?, Open University Press, London, 1983

[14] Fauvel, John, Let Newton be! A new perspective on his life and works, Shortland and Robin Wilson, Oxford University Press, 1988.

[15] Fernandes, Amadeu, O Sistema Solar, apontamentos da parte curricular do mestrado, 1999/2001

[16] Ferreira, Máximo et Almeida, Guilherme, Introdução à astronomia e às observaçãoes astronómicas, Plátano edições técnicas, 1996

[17] Gunstone, R.F., Two teaching strategies for considering children's science, Yearbook of International Council of the Association for Science Education, 2, 1-12, 1988

[18] Hartmann, William K., Astronomy: the cosmic journey, 4rd ed., Wadsworth, 1989

[19] Hildreth, Scott e Sneider, Cary, Astronomy Activities, The Universe at your fingertips, Project Astro, Astronomical Society of Pacific, 1995

[20] Hodson, D., Hacia un enfoque más critico del trabajo de laboratorio, Enseñanza de las Ciencias, 12 (3), 299-313, 1994

[21] Hodson, D., Redefining and reorienting practical work in school science, Sch Sci Rev, 73 (264), Mar 1992

[22] Jastrow, Robert, Viagem às estrelas, Ciência aberta, gradiva,1990

[23] Jobb, Jamie, O meu primeiro livro de astronomia – um guia diário para todas as noites, 1ª Ed., Gradiva Júnior, Agosto de 1993

[24] Kempa, R. F., Functions of and Approaches to Practical Work in Science, Proceedings of the Regional Conference in Botswana, Free University Press, Amsterdam, 1988

[25] Lago, Teresa, Estrelas e meio interestelar, apontamentos da parte curricular do mestrado, 1999/2001

[26] Lawrence Hall of Science, "Earth, Moon and stars" – Teacher's guide, University of California at Berkeley

[27] Maia, Hernâni, Evolução Cósmica e origem da vida, Livraria Almedina, 1985

[28] Martins, Anabela, Física em Temas 8º ano, Porto editora, 1995.

[29] Mcnab, David, Os planetas, atena, 1999

[30] Mendirata, Sushil Kumar, Introdução ao electromagnetismo, Fundação Calouste Gulbenkian, 1984

[31] Mochá, Dinah L., Astronomy a self- teaching guide, Jonh Wiley& Sons, Inc., 4 ed., 1993

[32] Monteiro, Mário João, Evolução Estelar, apontamentos da parte curricular do mestrado, 1999/2001

[33] Monteiro, Mário João, O Sol, apontamentos da parte curricular do mestrado, 1999/2001

[34] Morgado, Joaquim, Encontro com a Física, ciências Físico – Químicas 8º ano, Plátano Editora, 2000.

[35] Narlikan, Jayant V., The lghter side of gravity, W.H. Freeman and Company, San Francisco, 1982

[36] Narlikar, Jayant V., The lighter side of gravity, W.H. Freeman and company, San Francisco, 1982

[37] National Aeronautics and space administration, " Space based astronomy" – teacher's guide with activities, 1994

[38] Objectivos Gerais do Ensino básico e do ensino de Ciência no ensino básico, DEB, 2001

[39] Osborne, R., Freyberg, P., Learning in Science. The implications of Children's Science, Heinemann Educational Books, London, 1985

[40] Piaget, J., Inhelder, B., The Growth of Logical Thinking, Rontledge & Kegan Paul, 1958

[41] Pompea, Stephen M., Great Ideas for Teaching Astronomy – 2 edition, West Publishing Company, 1994

[42] Programa de Ciências Físico do 12º ano (1995), DES, Ministério da Educação, 1995

[43] Programa de Ciências Físico Químicas do 11º ano (1995), DES, Ministério da Educação, 1995

[44] Programa de Ciências Físico Químicas do 8º ano (1994), DES, Ministério da Educação, 1995

[45] Ranger Rick's Naturescope, Astronomy Adventures, National Wildlife Federation, Learnig triangle press, MacGraw-Hill, 1997.

[46] Redfern, Martin, The Kingfisher Book of Space, Kingfisher Publications plc, 1998

[47] Reeves, Hubert, Um pouco mais de azul – a evolução cósmica, Ciência aberta, Gradiva, 1994

[48] Ronan, Colin, História Natural do Universo, editorial Verbo, 1991

[49] Sagan, Carl, Cosmos, Gradiva, 4ª ed., 1994

[50] Sampaio e Sousa, Adriano, Propriedades Fisicas do Sol, Astro

[51] Schatz, Dennis et al., Astro adventures, Pacific Science Center, 1996

[52] Schatz, Dennis et al., Astronomy Activity Book, Little Simon, Published by Simon & Schuster, 1991

[53] Seti Institute, The Seti Academy Planet Project – Evolution of a Planetary System, Teacher Ideas Press, Englewood, CO, 1(800)237-6124

[54] Smith, Sallie M., Seeing the invisible – a lesson giving students an opportunity to discover ultraviolet and infrared radiation coming from the sun, NASA

[55] Sneider, Cary, Learning Astronomy, The Universe at your fingertips, Project Astro, Astronomical Society of the Pacific, 1995

[56] Tasker, R., Children's views and classroom experiences, Aus Sci Tea J., 27, 33-37, 1981

[57] The Universe at your fingertips, an astronomy activity and resource notebook, Project Astro, Astronomical Society of the pacific

[58] Vancleave, Janice, Astronomia para jovens, Colecção ciência para jovens, Publicações Dom Quixote, 1993

[59] Whitlock, Laura A., The life cycles of stars – an information and activity booklet grades 9-12, Imagine the universe, 1997

[60] Wiese, Jim, "Cosmic Science" – activities for kids, John Wiley &Sons, Inc., 1997

[61] Wiessman, Paul R., Encyclopedia of the solar system, academic press, 1999

[62] Wilson, Robin et al., Let Newton Be! A new perspective on his life and works, Oxford University Press, 1988

[63] Zeilik&Smith, Introductory Astronomy & Astrophysics 2nd ed., CBS College Publishing, 1986

ENDEREÇOS ELECTRÓNICOS DE REFERÊNCIA

http://pcastro7.if.ufrgs.br/index.htm

http://www.solarviews.com

http://www.iagusp.usp.br/~jane/aga215/aula01/inicio.htm

http://www.iagusp.usp.br/~jatenco/aga215/cap16/cap16.htm

http://pcastro7.if.ufrgs.br/galax/

http://pcastro7.if.ufrgs.br/univ/

http://csep10.phys.utk.edu/astr161/lect/earth/magnetic.html

http://www-istp.gsfc.nasa.gov/Education/index.html

http://www.iagusp.usp.br/~jane/aga215/index.html

UNIVERSIDADE DO PORTO
FACULDADE DE CIÊNCIAS
BIBLIOTECA

MATEMÁTICA APLICADA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
UNIVERSIDADE DO PORTO
PORTO—PORTUGAL

72275